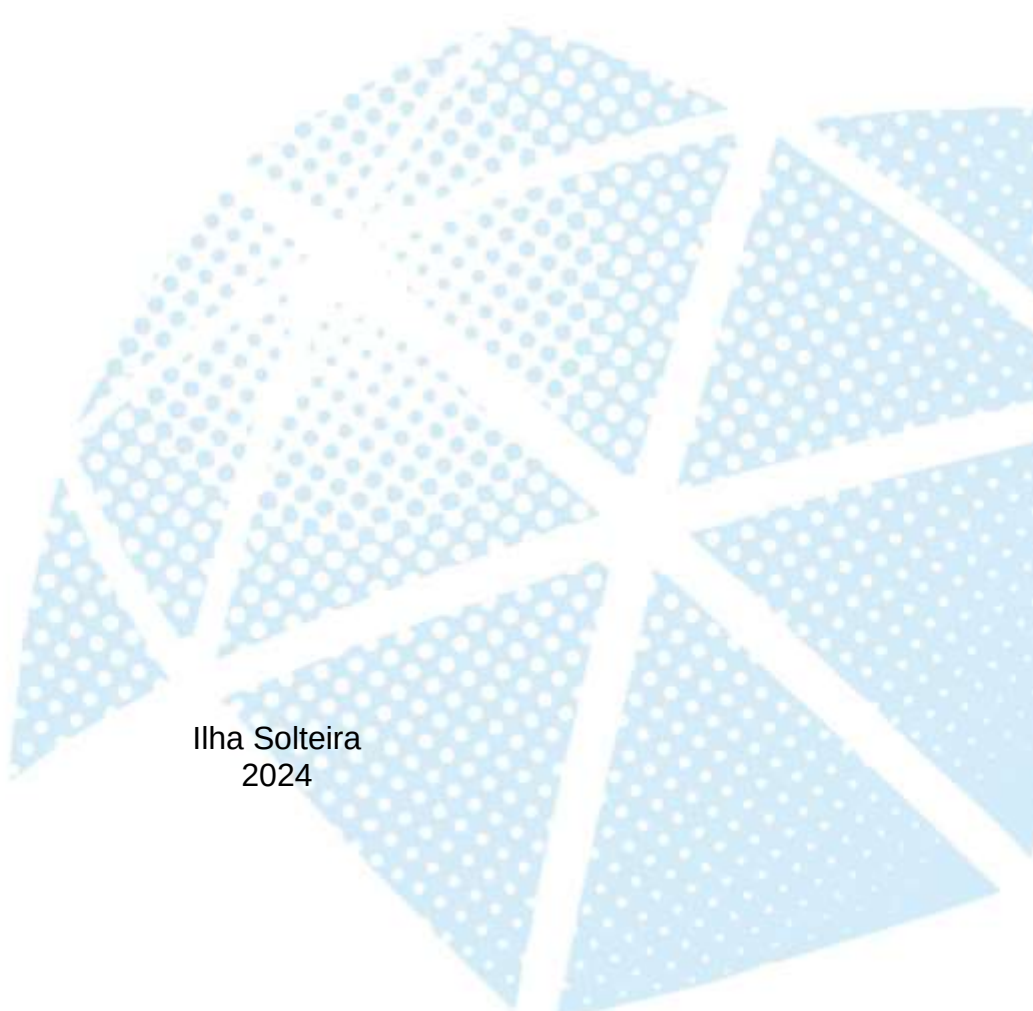


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GUILHERME AUGUSTO DONEGÁ ROCHA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE
POLIPROPILENO NO CONCRETO PERMEÁVEL**

Ilha Solteira
2024



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GUILHERME AUGUSTO DONEGÁ ROCHA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE
POLIPROPILENO NO CONCRETO PERMEÁVEL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Especialidade: Engenharia de Construção Civil.

Profa. Dra. Maria da Consolação
Fonseca de Albuquerque
Orientadora
Prof. Dr. Mauro Mitsuuchi Tashima
Coorientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R672a Rocha, Guilherme Augusto Donegá.
Análise da influência da adição de fibras de polipropileno no concreto permeável / Guilherme Augusto Donegá Rocha. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
93 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2024

Orientador: Maria Da Consolação Fonseca de Albuquerque

Co-orientador: Mauro Mitsuchi Tashima

Inclui bibliografia

1. Concreto permeável. 2. Fibra. 3. Polipropileno. 4. Resistência mecânica.


Amanda Sertori dos Santos
Bibliotecária - CRB/SP 9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Divisão Técnica de Biblioteca e Documentação

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O impacto da pesquisa sobre o concreto permeável com e sem adição de fibra de polipropileno tem um potencial significativo em várias áreas, incluindo:

Sustentabilidade ambiental: O uso de concreto permeável reduz o escoamento de águas pluviais na superfície, minimizando problemas de drenagem urbana, como enchentes e alagamentos. A permeabilidade do concreto também contribui para a melhoria da qualidade da água, filtrando-a em seus poros e recarregando o lençol freático, promovendo a conservação da água subterrânea.

Conforto térmico: O concreto permeável ajuda a minimizar o efeito de ilha de calor, pois absorve menos calor em comparação com o concreto convencional. Assim, melhora o conforto térmico em áreas urbanas e reduz o impacto do calor nas cidades.

Conforto acústico: A utilização do concreto permeável pode diminuir o ruído causado pelo tráfego de veículos, já que a sua estrutura absorve parte do som, proporcionando um ambiente urbano mais silencioso.

Segurança: O concreto permeável reduz a aquaplanagem, evitando acidentes de trânsito resultantes da perda de controle em superfícies escorregadias devido à água acumulada, aumentando a segurança nas vias.

Melhoria ambiental nos centros urbanos: O uso do concreto permeável favorece a vegetação urbana, pois permite que as raízes das plantas tenham acesso à água e nutrientes do solo, promovendo um melhor desenvolvimento da vegetação.

Resistência: A pesquisa sobre concreto permeável com e sem fibra de polipropileno pode resultar em materiais mais duráveis e resistentes, capazes de suportar condições de tráfego leve.

Em resumo, a pesquisa sobre o concreto permeável tem o potencial de promover a sustentabilidade ambiental, melhorar a qualidade de vida e criar infraestruturas mais resistentes e eficientes.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The impact of research on permeable concrete with and without the addition of polypropylene fibers has significant potential in various areas, including:

Environmental sustainability: The use of permeable concrete reduces surface stormwater runoff, minimizing urban drainage issues such as flooding and waterlogging. The permeability of the concrete also contributes to water quality improvement by filtering it through its pores and recharging the aquifer, promoting the conservation of groundwater.

Thermal comfort: Permeable concrete helps mitigate the urban heat island effect, as it absorbs less heat compared to conventional concrete. This improves thermal comfort in urban areas and reduces the impact of heat in cities.

Acoustic comfort: The use of permeable concrete can decrease noise caused by vehicle traffic, as its structure absorbs some of the sound, creating a quieter urban environment.

Safety: Permeable concrete reduces hydroplaning, preventing traffic accidents caused by loss of control on slippery surfaces due to accumulated water, thereby increasing safety on roadways.

Environmental improvement in urban centers: The use of permeable concrete supports urban vegetation, as it allows plant roots to access water and nutrients from the soil, promoting better plant growth.

Durability: Research on permeable concrete with and without polypropylene fibers can lead to the development of more durable and resilient materials capable of withstanding light traffic conditions.

In summary, research on permeable concrete has the potential to promote environmental sustainability, enhance quality of life, and create more resilient and efficient infrastructure

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO
NO CONCRETO PERMEÁVEL

AUTOR: GUILHERME AUGUSTO DONEGÁ ROCHA

ORIENTADORA: MARIA DA CONSOLAÇÃO FONSECA DE ALBUQUERQUE

COORIENTADOR: MAURO MITSUUCHI TASHIMA

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. EMERSON ALEXANDRO BOLANDIM (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Profa. Dra. TATIANA CUREAU CERVO (Participação Virtual)
Departamento de Transportes / Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Ilha Solteira, 27 de agosto de 2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Alessandro Rocha e Rosemeire Donegá, pelo amor incondicional, apoio emocional e incentivo constante durante toda esta jornada acadêmica. Sem o suporte de vocês, esta conquista não seria possível.

À minha orientadora, Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque, expresso minha profunda gratidão pela orientação, paciência e dedicação ao longo de todo o processo. Suas valiosas sugestões e críticas construtivas foram essenciais para o desenvolvimento e qualidade deste trabalho.

Aos professores e funcionários da Unesp, agradeço pela formação acadêmica sólida e pelos recursos oferecidos durante meu percurso na pós-graduação, que foram fundamentais para a realização deste estudo.

Aos meus colegas de curso e amigos, expresso meu sincero agradecimento pela companhia, apoio mútuo, discussões acadêmicas enriquecedoras e momentos de descontração que tornaram esta jornada mais leve e prazerosa.

Não faz mal que seja pouco O que importa é que o
avanço de hoje seja maior do que o de ontem,
que nossos passos de amanhã, sejam mais largos do
que os de hoje.
Daisaku Ikeda.

RESUMO

Este trabalho aborda os desafios decorrentes da urbanização crescente, que resulta em maior impermeabilidade do solo, provocando aumento no escoamento de água da chuva e efeito de ilha de calor nas cidades. No contexto brasileiro, os sistemas de drenagem urbana muitas vezes priorizaram eficiência hidráulica, negligenciando impactos ambientais. O concreto permeável é reconhecido por seus benefícios sustentáveis, como a redução do escoamento, melhoria da qualidade da água e alívio do efeito de ilha de calor. Contudo, sua porosidade pode comprometer a resistência mecânica. Aplicações e adoção do concreto permeável são limitadas, especialmente para tráfego veicular. Várias abordagens foram propostas para melhorar sua resistência, como materiais, misturas e aditivos. No presente trabalho, fibras poliméricas e brita de basalto, como agregado, foram usados na confecção do concreto permeável. O objetivo do uso desse material foi de avaliar a presença dessa fibra no concreto permeável. Foram analisadas as propriedades mecânicas do concreto permeável com 10% de sílica e adição de 1, 2, 3, 4Kg/m³ de fibra de Polipropileno. Foi possível verificar que a fibra de polipropileno no concreto permeável levou a redução na permeabilidade, massa específica e índice de vazios. Em relação à resistência mecânica, não foi observado variação significativa na resistência à compressão e compressão diametral, já na resistência à tração na flexão o acréscimo de 1 Kg/m³, apresentou um acréscimo de 8,9% e um significativo aumento no módulo de elasticidade (E) de 60,9%. Com 2 Kg/m³, houve leve queda de 2,9% na resistência à tração na flexão e um aumento de 44,95% no módulo de elasticidade. A adição de 3 Kg/m³ reduziu a resistência à tração na flexão em 8,9% e aumentou o E em 6,1%. Já com 4 Kg/m³, houve redução de 15,2% na resistência à tração na flexão, mas o E permaneceu semelhante ao da mistura de referência. Também foi possível observar maior capacidade de deformação pós pico com o aumento de acréscimo de fibra.

Palavras-chave: concreto permeável; fibra; polipropileno; resistência mecânica.

ABSTRACT

This work addresses the challenges arising from increasing urbanization, which results in greater soil impermeability, leading to increased stormwater runoff and urban heat island effects in cities. In the Brazilian context, urban drainage systems have often prioritized hydraulic efficiency, neglecting environmental impacts. Permeable concrete is recognized for its sustainable benefits, such as reducing runoff, improving water quality, and alleviating heat island effects. However, its porosity can compromise mechanical strength. The applications and adoption of permeable concrete are limited, especially for vehicular traffic. Various approaches have been proposed to improve its strength, including different materials, mixtures, and additives. In the present work, polymer fibers and basalt aggregate were used in the production of permeable concrete. The objective was to evaluate the effect of these fibers in permeable concrete. The mechanical properties of permeable concrete with 10% silica and the addition of 1, 2, 3, and 4 kg/m³ of polypropylene fiber were analyzed. It was found that the addition of polypropylene fiber to permeable concrete led to a reduction in permeability, specific mass, and void index. Regarding mechanical strength, there was no significant variation in compressive and diametral tensile strength. However, in terms of flexural tensile strength, the addition of 1 kg/m³ resulted in an 8.9% increase and a significant 60.9% increase in the modulus of elasticity (E). With 2 kg/m³, there was a slight decrease of 2.9% in flexural tensile strength and a 44.95% increase in the modulus of elasticity. The addition of 3 kg/m³ reduced flexural tensile strength by 8.9% and increased E by 6.1%. With 4 kg/m³, there was a 15.2% reduction in flexural tensile strength, but E remained similar to the reference mix. Additionally, a greater post-peak deformation capacity was observed with increased fiber content.

Keywords: permeable concrete; fiber; polypropylene; mechanical strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Alteração do Hidrograma com o Aumento da Urbanização	24
Figura 2 - Ilha de Calor	26
Figura 3 - Concreto Permeável	27
Figura 4 - Seção transversal típica de pavimento de concreto permeável	28
Figura 5 - Razão Tensão/Deformação	32
Figura 6 - Comportamento carga-deformação de concreto convencional e FRC35	
Figura 7 - Mecanismo de aumento de tenacidade à fratura do concreto com fibra	36
Figura 8 - Macro fibras de polipropileno disponíveis no mercado brasileiro	37
Figura 9 - Ensaio de Flexão	45
Figura 10 – Ensaio de tração na flexão	46
Figura 11 - Ensaio de Permeabilidade	50
Figura 12 - Diagrama de Dosagem	51
Figura 13 - Determinação do Traço	52
Figura 14 - Capeamento	55
Figura 15 - Densidade	56
Figura 16 - Índice de Vazios	58
Figura 17 - Resistência a Compressão Axial – Referência	61
Figura 18 - Resistência a Compressão Axial – 1Kg/m ³ Fibra	62
Figura 19 - Resistência a Compressão Axial – 2Kg/m ³ Fibra	62
Figura 20 - Resistência a Compressão Axial – 3Kg/m ³ Fibra	63
Figura 21 - Resistência a Compressão Axial – 4Kg/m ³ Fibra	63
Figura 22 - Resistência a Compressão Axial	64
Figura 23 - Resultados experimentais de amostras com diferentes teores de fibra de Polipropileno	66
Figura 24 - Resistência a Compressão Axial - Fibra de vidro (AR) x Polipropileno	67
Figura 25 - Tração por Compressão Diametral – Referência	68
Figura 26 - Tração por Compressão Diametral – 1Kg/m ³	69
Figura 27 - Tração por Compressão Diametral – 2Kg/m ³	69
Figura 28 - Tração por Compressão Diametral – 2Kg/m ³	70
Figura 29 - Tração por Compressão Diametral – 2Kg/m ³	70
Figura 30 - Tração por Compressão Diametral	71
Figura 31 - Diametral (AR x Polipropileno)	72
Figura 32 - Tração na Flexão - Referência	74
Figura 33 - Tração na Flexão – 1Kg/m ³	75
Figura 34 - Tração na Flexão – 2Kg/m ³	75
Figura 35 - Tração na Flexão – 3Kg/m ³	76
Figura 36 - Tração na Flexão – 4Kg/m ³	76
Figura 37 - Tração na Flexão	77
Figura 38 - Módulo de Elasticidade (E)	80

Figura 39 - Curva Tensão/Deformação	81
Figura 40 - Resistência à Tração na Flexão e Módulo de Elasticidade (Batezine 2013)	82
Figura 41 - Módulo de Elasticidade - Equação de Goede	83
Figura 42 - E - Experimental x Equação de Goede (2009).....	83
Figura 44 - Análise Visual Após Carga Máxima	85
Figura 45 - Tensão máxima x Flecha máxima.....	86
Figura 46 - Atuação de fibras no concreto	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de Permeabilidade.....	30
Tabela 2 - Características físicas e químicas do cimento	40
Tabela 3 - Massa específica, NBR e absorção de Água/Brita.....	41
Tabela 4 - Características físicas Macro fibra Duristeel FF54	42
Tabela 5 - Características da Sílica Ativa.....	43
Tabela 6 - Misturas Elaboradas em Massa	53
Tabela 7 - Densidade	57
Tabela 8 - índice de Vazios.	58
Tabela 9 - Coeficiente de Permeabilidade	60
Tabela 10 - ANOVA - Compressão Axial	65
Tabela 11 - Compressão Diametral (Trabalho x Gaedicke (2016))	72
Tabela 12 - ANOVA - Diametral	73
Tabela 13 - Tração na Flexão (Trabalho x Gaedicke (2016)).....	78
Tabela 14 - Comparação dos resultados de resistência à tração na flexão com a literatura.	78
Tabela 15 - ANOVA - Tração na Flexão.....	79
Tabela 16 - Resistência à Tração na Flexão, Flecha e Módulo de Elasticidade.....	82
Tabela 17 - Comparação E (Tração na flexão – Equação de Goede).....	84
Tabela 18 - Resistência à Tração na Flexão e Flecha	85
Tabela 19 – Comparativo: Tensão - E - Flecha.....	86

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

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

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>AR</i>	Álcali- Resistente
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
μ	Massa Específica
<i>a/c</i>	Relação água/cimento em Massa
<i>b</i>	Largura do Corpo de Prova Prismático
<i>b</i>	Quantidade de Brita em Massa
<i>c</i>	Comprimento
<i>Cc</i>	Consumo de Cimento
<i>D</i>	Massa específica aparente
<i>E</i>	Módulo de Elasticidade
<i>f</i>	Flecha no Meio do Vão do Corpo de Prova Prismático
<i>fc</i>	Resistência à Compressão Axial
<i>fcr,f</i>	Resistência à Flexão
<i>fct</i>	Resistência à Compressão Diametral
<i>FS</i>	“Flexural Stiffness” ou Módulo de Flexão
<i>h</i>	Altura do Corpo de Prova Prismático
<i>I</i>	Índice de Vazios
<i>k</i>	Coefficiente de Permeabilidade
<i>l</i>	Dimensão do Vão entre Apoios
<i>P</i>	Carga de Ruptura
<i>R²</i>	Coefficiente de Determinação
<i>γ_b</i>	Peso Específico Brita
<i>γ_{H2O}</i>	Peso Específico Água
ϵ	Deformação
<i>ρ_s</i>	Massa Específica Seca
<i>Mr</i>	Massa do recipiente
<i>Mt</i>	Massa total
<i>Vr</i>	Volume do recipiente
Φ	Índice de vazios do concreto

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação de Gaedicke.....	38
Equação 2 – Resistência a tração por compressão diametral.....	39
Equação 3 – Resistência a tração na Flexão.....	40
Equação 4 – Módulo de Elasticidade.....	48
Equação 5 – Módulo de Elasticidade Equação de Goede.....	49
Equação 6 – Massa Específica Aparente.....	49
Equação 7 – Porcentagem de Vazios.....	50
Equação 8 – Densidade Teórica	50
Equação 9 – Coeficiente de Permeabilidade.....	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Relevância e justificativa	21
1.2	Objetivos específicos	22
1.3	Estrutura do Trabalho	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Superfícies Permeáveis e Ilha de Calor	23
2.2	Concreto Permeável	26
2.3	Resistência Mecânica.....	30
2.4	Fibra de Polipropileno	34
2.4.1	<i>Impacto das Fibras na Trabalhabilidade do Concreto</i>	37
2.4.2	<i>Efeitos das Fibras de Polipropileno na Resistência à compressão do Concreto</i>	37
2.4.3	<i>Efeitos das Fibras de Polipropileno na Resistência à Tração do Concreto</i>	39
3	MATERIAIS E METODOS	40
3.1	Materiais	40
3.1.1	<i>Aglomerante.....</i>	40
3.1.2	<i>Agregado</i>	40
3.1.3	<i>Aditivo</i>	41
3.1.4	<i>Água.....</i>	42
3.1.5	<i>Fibra.....</i>	42
3.1.6	<i>Sílica</i>	42
3.2	Diretrizes para o Concreto Permeável	43
3.2.1	<i>Ensaio Mecânicos.....</i>	44
3.2.2	<i>Massa Específica Aparente</i>	47
3.2.3	<i>Percentual de Vazios.....</i>	48
3.2.4	<i>Ensaio de Permeabilidade: Procedimentos e Cálculo do Coeficiente</i>	49
3.3	Traço.....	51
3.4	Modo de Preparo	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1	Densidade e Índice de Vazios.....	56
4.2	Permeabilidade	59
4.3	Compressão Axial	60
4.4	Tração por Compressão Diametral	67

4.5	Tração na Flexão	74
4.6	Módulo de Elasticidade na Flexão (Módulo de Young)	79
5	CONCLUSÃO.....	88
	REFERÊNCIAS.....	91

1 INTRODUÇÃO

Com o progresso contínuo da urbanização, cada vez mais as cidades são cobertas com superfície impermeável. Consequentemente, a água e o ar não penetram no solo, resultando em dois grandes problemas, o rápido aumento de escoamento causado pela água da chuva, aumentando a pressão no sistema de drenagem, e o efeito da ilha de calor devido à incapacidade do solo de trocar calor e umidade com o ar (Ibrahim *et al.*, 2014).

No contexto brasileiro, devido à carência de planejamento e sensibilização, os sistemas de drenagem urbana têm historicamente enfatizado a busca por sistemas hidráulicos de máxima eficiência na drenagem, sem considerar adequadamente os efeitos resultantes a montante. Em outras palavras, o enfoque tem sido na condução das águas pluviais para fora das áreas urbanas, sem contemplar devidamente as implicações ambientais que ocorrem em sua descarga subsequente (Teixeira *et al.*, 2020). Portanto, torna-se essencial buscar técnicas construtivas que contribuam para a redução das áreas impermeáveis.

A utilização de pavimentos permeáveis desempenha um papel fundamental nesse contexto, podendo significativamente mitigar os problemas relacionados à impermeabilização superficial. Segundo (Chandrappa, 2016), o concreto permeável é amplamente reconhecido como material sustentável oferecendo vários benefícios, como a redução de escoamento de águas pluviais, melhoria da qualidade das águas pluviais, recarga do aquífero subterrâneo, redução do ruído em estradas, melhoria de resistência à derrapagem e alívio do efeito de ilha de calor.

Apesar dos benefícios ambientais mencionados, a estrutura porosa que permite o fluxo de água através do material também reduz sua resistência mecânica (Ibrahim *et al.*, 2014). O alto teor de porosidade do concreto permeável contribui para a infiltração de água, mas resulta na queda significativa de sua resistência mecânica (Sun; Lin; Vollpracht, 2018).

Geralmente, a resistência à compressão e de tração aos 28 dias do concreto permeável varia em média de 3,4 a 27,5 MP e 1,0 a 3,4 MPa respectivamente (Chandrappa, 2016). Relatório publicado pelo ACI (*American Concrete Institute*, 2010), indicou que a resistência à compressão do concreto permeável variou geralmente de 2,8 a 28 MPa enquanto a resistência à compressão do concreto

convencional varia de 17 a 40 MPa. Isso dificulta a implementação do concreto permeável, especialmente para o tráfego de veículos leves a médios.

Normalmente, suas aplicações são restritas a calçadas, estacionamentos, quadras esportivas e sub-bases para pavimentos convencionais. Além disso, a adoção de pavimentos de concreto permeável em vários países (principalmente emergentes) continua limitada devido à falta de normas e procedimentos técnicos relacionados à preparação do material, testes e práticas construtivas (Chandrappa, 2016).

Os parâmetros de dosagem e o método de compactação, seja in loco ou em laboratório, variam consideravelmente entre as pesquisas publicadas, cujo foco é avaliar as propriedades do concreto permeável, sejam elas hidráulicas ou mecânicas. Isso ocorre precisamente devido à ausência de normas e procedimentos técnicos que padronizem tais métodos (Yang; Jiang 2003).

Pesquisas demonstram que os principais fatores que afetam a resistência do concreto permeável são a porosidade, a relação água/cimento, as características da pasta e o tamanho e a quantidade dos agregados graúdos Chindaprasirt, *et al.*, (2008).

As propriedades mecânicas do concreto permeável podem ser aprimoradas utilizando materiais e proporções adequadas na mistura (Sumanasooriya; Neithalath, 2011). Yang e Jiang (2003), demonstraram que o uso de sílica ativa e superplastificante pode aumentar substancialmente a resistência do concreto permeável.

Saboo *et al.*, (2019), destacam que uma das maneiras de melhorar o comportamento estrutural dos pavimentos de concreto permeável é adicionar materiais finos com características pozolânicas, como cinza volante, metacaulim e sílica ativa. No entanto, os autores também afirmam que esse tipo de adição aumenta a homogeneidade do concreto e auxilia na ligação entre pasta e agregado, mas é limitado, pois a ausência de materiais finos é justamente o que garante a permeabilidade do concreto.

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

Ibrahim *et al.*, (2014), estimam que, para um concreto permeável ter um bom desempenho na drenagem de água, ele deve ter um índice de vazios entre 15% e 35%. Os autores indicam que, com esse percentual de vazios em seu volume, é possível garantir que os poros permaneçam conectados, permitindo a passagem da água.

Kistan *et al.*, (2023), analisaram a inclusão de 0,4% de fibras de polipropileno no concreto, aliada à substituição de 30% do teor de cimento por cinza volante, o que resultou em um aumento tanto na resistência à compressão quanto na resistência à tração na flexão desde os estágios iniciais, em comparação com o concreto convencional.

Segundo Li e Liu (2019), as fibras de polipropileno são fibras sintéticas de polímero comumente utilizadas como material de reforço em vários compósitos cimentícios e misturas de concreto.

Essas fibras são fabricadas a partir de polipropileno, um polímero termoplástico, e se caracterizam por sua leveza, resistência à corrosão e resistência à tração relativamente alta em comparação com seu peso.

Nesse contexto, é essencial promover o avanço da tecnologia dos pavimentos de concreto permeável visando mitigar os problemas decorrentes das áreas urbanas impermeáveis, enquanto se assegura uma adequada resistência mecânica. Neste sentido, a análise do concreto permeável com adição de fibras de polipropileno representa uma abordagem significativa para avaliar novos materiais que contribuam para a utilização de pavimentos permeáveis.

1.1 Relevância e justificativa

O emprego de fibras de polipropileno em concreto permeável apresenta múltiplas justificativas associadas às propriedades específicas dessas fibras e às características inerentes ao concreto permeável. Entre elas, destacam-se a melhoria da tenacidade e resistência à fissuração, a redução de fissuras e deformações por retração, o incremento da durabilidade e a compatibilidade com a permeabilidade (Li e Liu 2019).

Com isso, a justificativa de utilização de fibras de polipropileno se baseia no objetivo de analisar as características mecânicas do concreto com fibra, a fim de contribuir com dados sobre o material e seu uso no pavimento.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho foram:

- Elaborar corpos de prova de concreto para pavimentos permeáveis com adição de sílica e adição de fibras de polipropileno visando comparar adequadamente aos requisitos, tanto de propriedades de drenagem quanto mecânicas.
- Analisar os corpos de prova desenvolvidos em relação a sua permeabilidade, porosidade, massa específica e resistências a compressão axial e diametral e a tração na flexão.

1.3 Estrutura do Trabalho

O primeiro capítulo deste trabalho de dissertação apresenta a introdução ao tema a ser investigado, delineando seus objetivos gerais e específicos, além de destacar a estrutura formativa adotada.

O segundo capítulo delinea, por meio de uma revisão bibliográfica, as principais características dos pavimentos de concreto permeável, assim como a influência das adições utilizadas em trabalhos de outros pesquisadores.

O terceiro capítulo aborda a metodologia experimental, abrangendo os materiais empregados e os métodos adotados no estudo.

O quarto capítulo engloba os resultados obtidos pelo autor, proporcionando uma análise e discussão aprofundada desses resultados, acompanhados de comparações com a literatura estudada.

O quinto capítulo oferece uma síntese das conclusões gerais e dos aspectos mais relevantes do trabalho. Por fim, o sexto capítulo consiste na apresentação das referências bibliográficas consultadas e utilizadas na elaboração da dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção é subdividida em tópicos para elucidar a revisão bibliográfica empregada na análise sobre concreto permeável, abrangendo desde a situação das condições dos sistemas de drenagem urbano, até os métodos de análise de concretos permeáveis e os fatores preponderantes que impactam em suas propriedades finais.

O propósito desta seção é desenvolver uma compreensão objetiva e sucinta, ao mesmo tempo em que, se apresentam as referências literárias utilizadas para a comparação dos resultados obtidos e os principais fatores aplicados em suas respectivas metodologias.

2.1 Superfícies Permeáveis e Ilha de Calor

O aumento das populações e sua aglomeração nas regiões urbanas das metrópoles, aliado a um processo não estruturado de urbanização, culmina em uma amplificação das superfícies impermeáveis e, por conseguinte, provoca uma sobrecarga nos sistemas de escoamento urbano Schneider, *et al.* (2009).

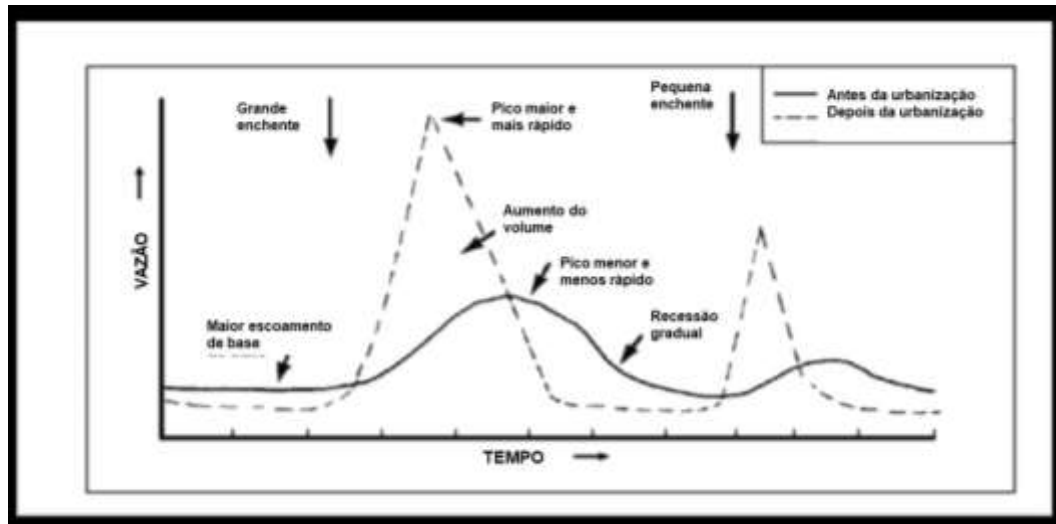
Chuvas de grande magnitude contribuem para a manifestação de enchentes, caracterizadas pelo acúmulo indesejado de água em áreas urbanas, afetando inúmeras cidades ao redor do mundo. Nos últimos anos, houve um aumento na frequência desses eventos extremos de precipitação (Ipea, 2021).

Conforme o IPCC (*The Intergovernmental Panel on Climate Change*), 2014, essa tendência continuará em crescimento devido às mudanças climáticas. Esse fenômeno representa um desafio particular nas áreas urbanas, devido às suas implicações ambientais e socioeconômicas, como a contaminação de fontes de água para abastecimento e problemas de mobilidade.

De acordo com Schneider, *et al.* (2009), o processo de impermeabilização provoca uma redução drástica na infiltração e interceptação da água da chuva. Além disso, as superfícies impermeabilizadas, como pavimentos, calçadas e telhados, direcionam rapidamente a água precipitada para os sistemas de drenagem urbana, que por sua vez concentram esses volumes nos principais rios. Esse processo de

impermeabilização resulta em variações rápidas no fluxo de escoamento, como representado na Figura 1.

Figura 1 - Alteração do Hidrograma com o Aumento da Urbanização



Fonte: Adaptado de Schueller e Stix 1987.

Conforme o IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), 2021, uma das alternativas para conter os problemas urbanos com relação a enchentes são os pavimentos projetados para permitir a infiltração das águas pluviais até coletores subterrâneos e para tratar essas águas por meio de um filtro composto por areia e brita. Essa abordagem pode ser aplicada em ruas, estradas com tráfego leve ou pesado e também em estacionamentos. Existem três tipos principais desses pavimentos:

- i) Pavimentos porosos de asfalto ou concreto, que envolvem misturas convencionais de asfalto ou concreto, mas com a remoção dos agregados mais finos para torná-los mais permeáveis.
- ii) Blocos de concreto intertravados, que permitem a passagem da água através dos espaços entre os blocos.
- iii) Sistemas de grades plásticas, que têm uma quantidade mínima de superfície impermeável, oferecendo estabilidade estrutural ao mesmo tempo que favorecem a infiltração.

Além de problemas com relação a enchentes no meio urbano, outros relacionados à crescente impermeabilidade do solo causam transtornos e se faz necessário estudo para prevenção ou mitigação, como o caso da ilha de calor.

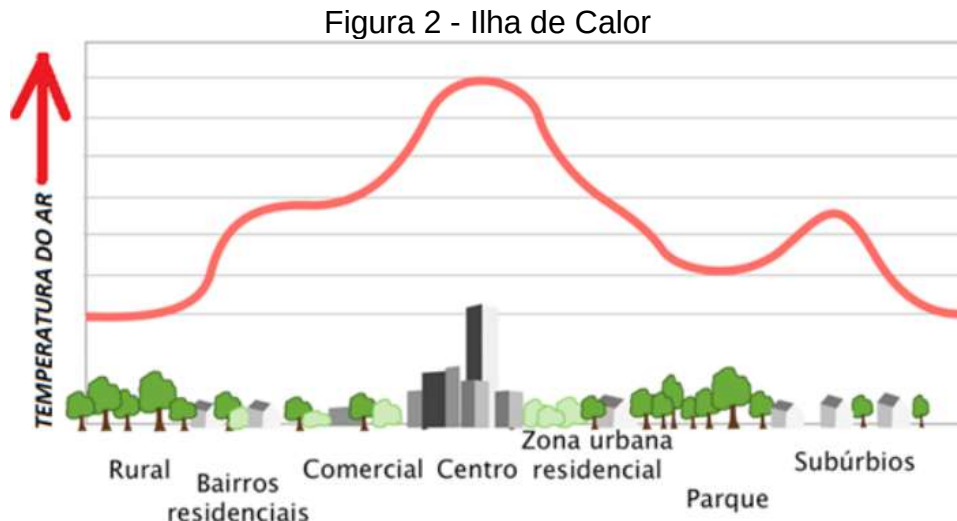
É claramente evidente que os problemas ligados ao clima urbano, sobrecarga nos sistemas de escoamento urbano, a formação de ilhas de calor, os impactos causados por eventos de precipitação e os problemas decorrentes da poluição do ar, são mais visíveis e percebidos pela população em grandes aglomerações urbanas.

No entanto, diversos estudos realizados tanto na climatologia brasileira quanto em âmbito internacional demonstram que, da mesma forma que nas grandes metrópoles, cidades de médio e pequeno porte também têm passado por transformações significativas na paisagem natural (Amorim, 2019).

Para Amorim, 2017, essas transformações se manifestam por meio de diversas formas de poluição do ar, água, solo e subsolo, além de mudanças na morfologia e na estrutura do ambiente urbano. Rios e córregos são retificados ou têm seus cursos modificados, a morfologia é alterada por meio de aterros e construções, e a vegetação é removida. Além disso, a interação das atividades urbanas com os padrões de uso do solo causa alterações nos processos dinâmicos da atmosfera e, por conseguinte, nos elementos climáticos.

Segundo Wang, 2019, a ilha de calor urbana é a de uma cidade onde as temperaturas do ar na área urbana são mais altas em comparação com as regiões rurais ao redor, conforme ilustrado na Figura 2. Isso é principalmente causado pela elevada capacidade térmica dos materiais de construção, pela diminuição do fluxo de calor latente devido ao aumento do escoamento de água superficial, pelo aumento do calor antropogênico e em conjunto com a redução da quantidade de espaços abertos e áreas verdes em ambientes urbanos.

A maioria das cidades brasileiras está situada em regiões de clima tropical, onde as altas temperaturas predominam durante a maior parte do ano. A maneira pela qual o ambiente urbano é planejado e desenvolvido intensifica essa condição natural, levando as temperaturas a níveis tão elevados resultando no fenômeno amplamente reconhecido das Ilhas de Calor Urbanas.



Segundo Jumari, *et al.*, (2023), edificações construídas pelo ser humano, como residências e estradas, absorvem e irradiam o calor solar de maneira mais eficaz do que ambientes naturais, como florestas e corpos d'água. Devido à concentração densa dessas estruturas e à falta de vegetação próxima, as áreas urbanas geram regiões com temperaturas mais elevadas, em contraste com as áreas rurais circundantes.

2.2 Concreto Permeável

Conforme apontado por Lopes *et al.*, (2020), a redução das regiões permeáveis concorre para a intensificação do escoamento superficial, acarretando desafios urbanos como inundações, alagamentos e degradação da qualidade das águas, dentre outros como formação de ilha de calor.

Esses problemas ambientais tem sido efetivamente controlado pela introdução de pavimentos permeáveis, proporcionando oportunidades únicas para gerenciar as águas pluviais no local como medidas de controle de fonte (Teixeira *et al.*, 2020).

No contexto brasileiro, devido a um planejamento insuficiente e à falta de conscientização, os sistemas de drenagem urbana foram predominantemente concebidos com foco na maximização da eficácia hidráulica de drenagem, negligenciando os efeitos que se manifestam a montante, isto é, direcionando as águas pluviais para fora das áreas urbanas sem devidamente considerar as

consequências ambientais resultantes em sua descarga subsequente (Teixeira *et al.*, 2020).

O pavimento de concreto permeável representa uma abordagem singular e eficaz para atender às demandas ambientais em constante crescimento. Ao captar a água da chuva e permitir sua infiltração no solo, o concreto permeável desempenha um papel crucial na recarga dos aquíferos subterrâneos e na redução do escoamento superficial das águas pluviais, como ilustrado na figura 3.

Segundo Tennis *et al.*, (2004), o uso de concreto permeável é uma das Melhores Práticas de Gestão (BM - *Best Management Practices*) recomendadas pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA - *Environmental Protection Agency*), bem como por outras agências e engenheiros geotécnicos em todo o país, para o manejo do escoamento de águas pluviais em nível regional e local. Essa tecnologia de pavimentação permite um uso mais eficiente do solo ao eliminar a necessidade de lagoas de retenção, valas e outros dispositivos de gerenciamento de águas pluviais. Dessa forma, o concreto permeável tem o potencial de reduzir os custos totais do projeto em termos de custo inicial.

Figura 3 - Concreto Permeável



Fonte: Próprio autor.

De acordo com ACI, 2010, os pavimentos de concreto permeável são caracterizados como um tipo de pavimento de concreto que possui uma matriz porosa

interconectada, permitindo o fluxo da água de revestimento para as camadas de base e sub-base, conforme ilustrado na Figura 4.

O concreto permeável contém em sua composição um agregador fino (areia) e quantidades controladas de água e materiais cimentícios. A mistura reverte e regula as partículas do agregador para criar um sistema de vazios interconectados que facilitam o rápido escoamento da água (Tennis, 2004).

Em geral, a porosidade no concreto varia de 15% a 25%, resultando em taxas de escoamento de água pelo meio do concreto permeável entre 2 e 18 gal./min/ft² (81 a 730 L/min/m²), correspondente a 192 a 1.724 litros/hora (488 a 4.379 cm/h) (Tennis, 2004).

Figura 4 - Seção transversal típica de pavimento de concreto permeável



Fonte: adaptada do EPA (2010).

Possivelmente, o benefício de maior relevância oferecido pelo concreto permeável reside em sua aplicação como uma ferramenta de gestão de águas pluviais. O escoamento de águas pluviais em regiões urbanizadas (muitas vezes resultante ou agravado pela presença de pavimentos convencionais impermeáveis) possui o potencial de contaminar as fontes de água superficiais e subterrâneas, além de contribuir para inundações e erosão (Tennis *et al.*, 2004).

O concreto permeável tem a capacidade de ser empregado com a finalidade de mitigar o escoamento das águas pluviais, reduzir a presença de contaminantes nos corpos d'água e revitalizar os suprimentos de água subterrânea. Devido à sua elevada permeabilidade, o concreto permeável consegue de maneira eficaz capturar o "primeiro fluxo" da chuva (a parte do escoamento com concentração mais alta de contaminantes) e permitir sua infiltração no solo, onde ocorre a filtração e o "tratamento" por meio dos processos químicos e biológicos do solo (Tennis *et al.*, 2004; ACI, 2010).

Ibrahim *et al.*, (2014) propõem que a obtenção de um desempenho eficaz na drenagem de água em concreto permeável requer um intervalo de 15% a 35% de vazios. Os pesquisadores destacam que essa faixa de vazios no volume do concreto assegura a interconexão dos poros, possibilitando a passagem da água. Para alcançar esses níveis, a fabricação de concreto permeável envolve a eliminação ou redução dos materiais finos que normalmente são utilizados na produção de concreto, tais como agregados miúdos e materiais pozolânicos.

Devido às características materiais únicas do concreto permeável, existem diversos requisitos especiais para a sua construção. A maioria dos concretos permeáveis é colocada utilizando formas fixas. Aspectos-chave para colocação e compactação do concreto permeável são os seguintes:

a) Para projetos menores, uma régua de nivelamento manual ou uma régua vibratória podem ser adequadas para a colocação, enquanto para projetos maiores pode-se empregar uma régua vibratória em formato de A com baixa frequência. Alguns projetos têm utilizado niveladoras a laser e equipamentos de moldagem contínua de concreto.

b) A compactação geralmente é realizada rolando o concreto com um rolo de aço.

c) Devido ao baixo teor de água e à natureza porosa do concreto permeável, é essencial que a entrega e a colocação sejam concluídas o mais rapidamente possível (Tennis *et al.*, 2004; ACI, 2010).

No cenário brasileiro, a norma que estabelece os parâmetros para o concreto permeável é a NBR 16416 (ABNT, 2015), a qual demanda um coeficiente mínimo de permeabilidade de 1 mm/s.

A norma Brasileira NBR 16416 trata de pavimentos permeáveis de concreto e estabelece que o pavimento de concreto permeável moldado *in loco* deve ter um coeficiente de permeabilidade acima de 1mm/s. Neste contexto, Elango *et al.*, (2021) propõem uma faixa média de coeficiente de permeabilidade entre 2 e 8 mm/s para o concreto permeável. A tabela 1 traz a relação de coeficientes de permeabilidade usados dentre alguns autores.

Tabela 1 - Coeficientes de Permeabilidade

Pesquisadores	Taxa de permeabilidade (mm/s)
Debnathi; Sarkar (2019)	5,3 a 19,1
Guneyisi <i>et al.</i> , (2014)	5,9 a 12,4
Hussan <i>et al.</i> , (2019)	1,9 a 21,1
Zaetang <i>et al.</i> , (2013)	3,0 a 29,3
Zaetang <i>et al.</i> , (2014)	5,9 a 12,4

Fonte: Próprio autor.

2.3 Resistência Mecânica

O concreto permeável pode ser formulado empregando os mesmos componentes encontrados nas misturas de concreto convencional de cimento Portland, com a distinção de que a proporção de agregados de granulometria fina é reduzida.

Os elementos constituintes do concreto permeável incluem, essencialmente, aglomerante, agregados e água. Quando ajustados na proporção adequada, esses componentes conferem uma estrutura sólida que apresenta poros interconectados, permitindo a passagem da água.

Apesar da aparente simplicidade dos componentes que constituem o concreto permeável, a utilização exclusiva dos materiais comumente empregados em concretos convencionais resultará em um concreto de baixa capacidade de resistência mecânica.

Portanto, é imperativo introduzir a utilização de aditivos e incorporar materiais que permitam a obtenção de resistência sem comprometer excessivamente a permeabilidade. Dentro dessas opções, os materiais pozolânicos se destacam, uma vez que sua adição à composição do concreto promove um aumento significativo na resistência mecânica (Bigotto, 2021).

Os pavimentos de concreto permeável podem ser concebidos empregando virtualmente qualquer procedimento padrão para pavimentação de concreto. A Associação Americana de Pavimentação de Concreto desenvolveu recentemente um programa abrangente denominado *PerviousPave*, que pode ser empregado para a elaboração de projetos estruturais e hidrológicos para pavimentos permeáveis (Bigotto, 2021).

Independentemente do procedimento adotado, existem fatores críticos a serem considerados no projeto de pavimentos de concreto permeável (ACI, 2010), dentre eles:

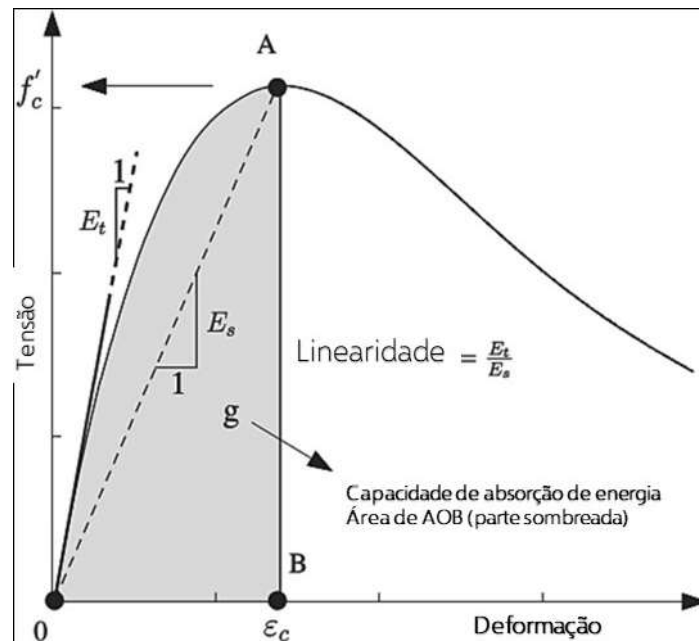
Resistência à flexão do concreto: A resistência à flexão do concreto representa um parâmetro crucial no projeto estrutural de pavimentos de concreto. Todavia, a realização de testes para sua determinação, em concreto permeável, pode estar sujeita a alta variabilidade; assim, é comum avaliar as resistências à compressão e recorrer a relações empíricas para estimar a resistência à flexão a serem empregadas no projeto (Tennis *et al.*, 2004).

Aplicações de carregamento de tráfego: A carga antecipada a ser suportada por um pavimento permeável é geralmente caracterizada em relação a repetições equivalentes de carga de eixo único de 18.000 lb (80 kN), as quais diversos procedimentos calculam diretamente com base em distribuições de tráfego de caminhões presumidas. Em sua maioria, os pavimentos de concreto permeável são empregados em aplicações de tráfego com baixa intensidade de movimentação de caminhões.

As composições de concreto permeável têm a capacidade de desenvolver resistências à compressão dentro da faixa de 500 psi a 4000 psi (3,5 MPa a 28 MPa), o que as torna adequadas para uma diversidade abrangente de aplicações. Os valores típicos situam-se em torno de 2500 psi (17 MPa) (Tennis *et al.*, 2004; ACI, 2010).

A investigação e o cálculo da dureza do material há muito se baseiam em uma propriedade mecânica crucial conhecida como módulo de elasticidade. Essencialmente, este módulo é definido como a razão entre tensão e deformação, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Razão Tensão/Deformação



Fonte: Zhong; Wille (2015).

O módulo de elasticidade do concreto permeável é influenciado pelo nível de compactação, pelos componentes da mistura e pelas características do agregado. Devido aos espaços vazios, o concreto permeável apresenta um módulo de elasticidade inferior ao do concreto (Bigotto, 2021).

No geral, o módulo de elasticidade do concreto permeável é significativamente menor do que o do concreto convencional. O concreto convencional possui um módulo de elasticidade que varia de 21 a 42 GPa, enquanto no concreto permeável essa faixa varia de 2 a 20 GPa (Wang *et al.*, 2019).

A faixa de módulos de elasticidade do concreto permeável é amplamente debatida devido às diferentes amplitudes de valores obtidos por pesquisadores. Por exemplo, Alam e Haselbach (2014), observaram uma faixa de módulo de elasticidade entre 1 e 16 GPa para concreto com porosidade de 15% a 31%, enquanto Zhong e Wille (2015), relataram uma faixa de 16,2 a 22,3 GPa para uma porosidade de 17% a 31%.

Várias tecnologias foram propostas para melhorar a resistência do concreto permeável, incluindo materiais, projeto de misturas e aditivos (Wang *et al.*, 2019).

Segundo Yang e Jiang (2003), o concreto permeável possui maior permeabilidade, menor peso unitário, melhor capacidade de isolamento térmico e menor retração por secagem, mas apresenta pouca resistência à compressão, tração e aderência.

Elango *et al.* (2021), analisaram as propriedades do concreto poroso realizado com cimento Portland, chegando ao resultado de que a resistência do concreto permeável com taxas de vazios de 15%, 20% e 25% está entre 38 e 44 MPa, 29 e 35 MPa, e 15 e 22 MPa, respectivamente. Adamu *et al.*, (2021) estudaram o desempenho de durabilidade do concreto permeável contendo cinza de casca de arroz e resíduos de carboneto de cálcio (CCW) na substituição do cimento Portland em percentuais de 5%, 10%, 15% e 20%. O trabalho mostrou que tanto a adição da cinza de casca de arroz quanto o resíduo de carboneto de cálcio tiveram efeito negativo na durabilidade do concreto permeável.

Tan *et al.*, (2021), investigaram o uso de biocarvão de biomassa residual como enchimento higroscópico no concreto permeável, concluindo que a substituição do biocarvão em pequena quantidade em relação ao cimento convencional pode efetivamente melhorar o desempenho de resfriamento/evaporação do concreto.

Polímeros foram empregados para modificar o desempenho do concreto permeável. Estudos têm demonstrado que polímeros em forma de fibras são úteis para aumentar a permeabilidade, ao mesmo tempo em que melhoram a resistência à tração (Sun; Lin; Vollpracht, 2018).

Philip *et al.*, (2023) investigaram as fibras de basalto com 24 mm de comprimento em diversas proporções - 0,0%, 0,2%, 0,3% e 0,4% - incorporadas no concreto permeável, concluindo que a proporção de 0,3% resultou nos valores máximos de resistência à compressão, resistência à tração por cisalhamento e resistência à flexão, sugerindo que essa porcentagem é a ideal para o concreto.

A introdução de fibras conduziu à criação de duas categorias de materiais: o concreto reforçado com fibras convencional (FRC - *Fibers Reinforced with Conventional*) e os compósitos cimentícios de elevado desempenho, conhecidos por diversas denominações, tais como compósitos cimentícios de engenharia (ECC - *Engineering Cementitious Composites*), compósitos à base de cimento com endurecimento por deformação (SHCC - *Strain Hardening Cement Composites*), compósitos cimentícios reforçados com fibras de alto desempenho (HPFRCC) e

compósitos cimentícios de ultra alta tenacidade (UHTCC - *High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites*) (Li, et al., 2022)

Armandei et al. (2015), conduziram uma investigação sobre o impacto da incorporação de fibras de aço na textura superficial do concreto. Os resultados indicaram um incremento na rugosidade da superfície da matriz quando comparada ao concreto não reforçado simples, atribuível à presença das fibras de aço adicionadas.

Em relação à fibra de aço, a fibra de polipropileno em escala macro apresenta as qualidades vantajosas de baixa densidade e resistência à corrosão. Contudo, é importante observar que há uma carência de estudos abrangentes acerca dos impactos das fibras de polipropileno, em escala macro, sobre a configuração das fissuras (incluindo sua tortuosidade e a rugosidade da superfície fissurada), bem como sobre a permeabilidade intrínseca do concreto (Li; Liu, 2019).

2.4 Fibra de Polipropileno

Diversas abordagens têm sido propostas por pesquisadores, incluindo a incorporação de fibras de polipropileno (PPFs - *Polypropylene fibers*) e fibras macro sintéticas de polipropileno de alto desempenho (HPP - *High-performance Macro Synthetic Polypropylene Fibers*) no desenvolvimento de composições de concreto, com o intuito de superar as limitações do concreto de alto desempenho (HPC - *High-performance concrete*). No Brasil, a norma que rege o uso da fibra de polipropileno é a NBR 16942 de 2021.

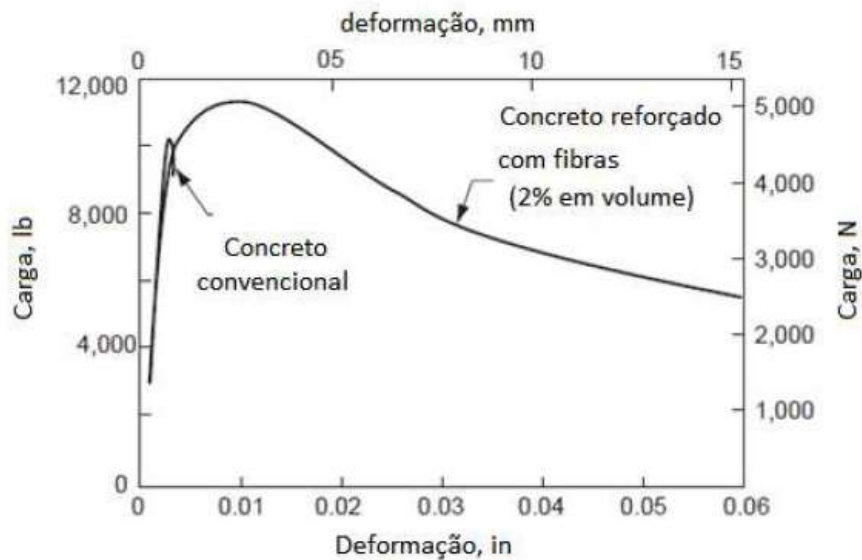
A utilização de fibras compensa a fragilidade do comportamento à tração. Adicionalmente, a formação de fissuras no concreto confere-lhe maior ductilidade, pois ao redistribuir as fissuras no corpo do concreto dificulta a transferência adequada de tensões de tração. É importante notar que o tipo, a porcentagem e a geometria das fibras constituem fatores de relevância que influenciam o comportamento do material concreto (Bentur; Mindess, 2007).

Em relação às propriedades mecânicas, os polímeros são caracterizados por exibirem diferentes graus de ductilidade, resistência à tração moderada e baixo módulo de elasticidade.

Bentur e Mindess (2007), argumentam que a inclusão de fibras na argamassa resulta em um acréscimo na resistência à tração do concreto, uma maior capacidade de deformação e um aumento da tenacidade. Além dessas características, destacam o aumento da resistência ao impacto, à flexão e do módulo de ruptura.

Na Figura 6, são apresentadas as curvas de carga-deformação, no ensaio de flexão, para o concreto convencional e o concreto reforçado com fibras (FRC - *Fiber-reinforced concrete*), enquanto a Figura 7 ilustra o mecanismo pelo qual a tenacidade à fratura do concreto com fibras é aumentada.

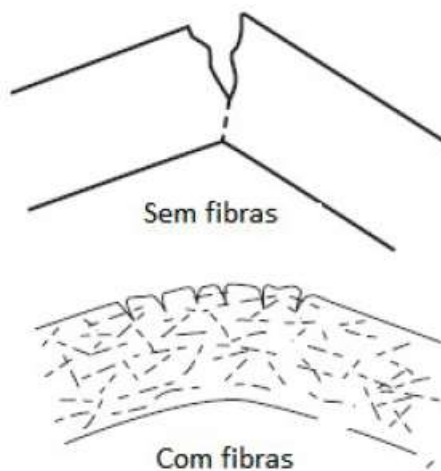
Figura 6 - Comportamento carga-deformação de concreto convencional e FRC



Fonte: Adaptado de Mehta; Monteiro (2008).

Durante o ensaio para determinar a resistência à flexão, o concreto convencional apresenta uma ruptura abrupta assim que a deformação correspondente excede a resistência máxima à flexão. No entanto, o FRC é capaz de suportar cargas substanciais mesmo quando submetido a deformações que excedem a deformação de fratura do concreto convencional. Isso resulta em um corpo de prova de FRC que, após o início da fissuração, não chega a se romper, ao contrário do concreto convencional (Lucena, 2017).

Figura 7 - Mecanismo de aumento de tenacidade à fratura do concreto com fibra



Fonte: Adaptado de Mehta; Monteiro)2008).

Os experimentos realizados por Kaookei *et al.*, (2021) demonstram que a resistência à compressão, tração e flexão do concreto aumenta significativamente com a adição de um volume substancial de fibras. A introdução de fibras no concreto visa, principalmente, melhorar a estabilização da propagação de trincas e aumentar a capacidade de deformação do material. As fibras contribuem para a elevação da capacidade de deformação, aumento da rigidez e resistência ao impacto, além de controlar o processo de fissuração do concreto (Plizzari; Mindess, 2019).

Conforme relatado por Bentur e Mindess (2016), a incorporação de fibras de polipropileno no concreto é notavelmente prática em comparação com outros materiais disponíveis no mercado, pois não resulta na formação de aglomerados, o que facilita a sua aplicação. Essas fibras são inertes e não apresentam riscos de corrosão, uma preocupação comum associada às fibras de aço. Além disso, devido à sua leveza extrema, quase não influenciam no peso próprio da estrutura. O custo relativamente baixo do polipropileno torna essa abordagem ainda mais atraente, combinando bom desempenho com um custo reduzido.

As fibras de polipropileno são fabricadas a partir de resinas de polipropileno, que possuem moléculas de peso molecular elevado. A disposição atômica regular dessas macromoléculas permite a produção de fibras em forma cristalina, que são posteriormente processadas para atingir um alto grau de orientação, necessário para obter propriedades mecânicas favoráveis (Bentur; Mindess, 2007).

De acordo com Figueiredo (2011), as fibras de polipropileno podem ser classificadas em dois grupos principais: microfibras e macrofibras. As microfibras

podem ser fibriladas ou monofilamentares. As fibras fibriladas consistem em uma trama de filamentos finos com seções transversais retangulares, o que favorece a adesão entre a fibra e a matriz. Por outro lado, as fibras de monofilamento são cortadas em comprimentos padronizados e apresentam diferentes diâmetros, variando aproximadamente entre 50 μm e 0,5 mm. Figueiredo (2011), também destaca que as macrofibras de polipropileno, ilustradas na Figura 8, foram desenvolvidas para fornecer reforço estrutural, seguindo uma abordagem semelhante à das fibras de aço.

Figura 8 - Macro fibras de polipropileno disponíveis no mercado brasileiro



Fonte: Figueiredo (2011).

2.4.1 Impacto das Fibras na Trabalhabilidade do Concreto

A trabalhabilidade do concreto pode ser comprometida pela inclusão de fibras, especialmente quando são utilizadas em quantidades excessivas, tornando a aplicação da mistura mais complexa em estruturas de concreto reforçado. Arunachalam e Jayakumar (2015), realizaram um ensaio de abatimento para avaliar a trabalhabilidade de misturas de concreto de alto desempenho, variando os teores de fibras de polipropileno de 0,1% a 0,6%. Os resultados indicaram uma redução na trabalhabilidade com o aumento do teor de fibras, sendo que a proporção de 0,6% apresentou a menor trabalhabilidade entre todas as misturas examinadas.

2.4.2 Efeitos das Fibras de Polipropileno na Resistência à compressão do Concreto

Segundo Abaeian, *et. al.*, (2018), o emprego de níveis excessivamente elevados de fibras pode levar a uma redução na resistência à compressão do concreto. Essa

diminuição é atribuída ao aumento da porosidade e à incorporação de ar, bem como à natureza frágil da aderência entre as fibras e os agregados do concreto.

Em contrapartida, Hosseinzadeh *et al.*, (2023) relataram que a incorporação de fibras de polipropileno (PPF - *Polypropylene fibers*) em uma proporção de 0,5% resulta no aumento da resistência à compressão e à tração do concreto. A redução da relação água-cimento contribui ainda para a diminuição na absorção de água, tanto volumétrica quanto capilar. As características texturizadas das fibras de PPF também ajudam a diminuir a permeabilidade à água no concreto.

Por outro lado, Abaeian, Behbahani e Moslem (2018), observaram que a incorporação de 1 kg/m³ de fibras de polipropileno não teve impacto significativo na resistência à compressão. Contudo, ao aumentar a quantidade de fibras para 2 kg/m³ e 3 kg/m³, houve uma redução na resistência à compressão de 4,3% e 12,7%, respectivamente.

Além da resistência à compressão, a resistência à tração por compressão diametral também pode ser analisada. Gaedicke *et al.*, (2016) associaram a resistência à compressão axial à resistência à tração por compressão diametral no concreto permeável, utilizando a Equação 1.

$$f_{ct,sp} = 0,181 * (f_c)^{0,875} \quad (1)$$

Onde:

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

f_c : Resistência a compressão axial (MPa);

De forma similar, Chhorn *et al.*, (2018), relacionaram a resistência à compressão axial à resistência à tração por compressão diametral em concreto compactado por rolo com abatimento igual a zero, empregando a Equação 2.

$$f_{ct,sp} = 0,47 * (f_c)^{0,511} \quad (2)$$

Onde:

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

f_c : Resistência a compressão axial (MPa);

2.4.3 Efeitos das Fibras de Polipropileno na Resistência à Tração do Concreto

A inclusão de fibras no concreto não está diretamente associada ao aumento da resistência à compressão. Seu papel essencial reside na formação de uma estrutura de ligamento que facilita a transferência de tensões através das fissuras quando o concreto é submetido a esforços de tração (Plizzari; Mindess, 2019).

De acordo com Ganazini (2019), no concreto sem fibras, a formação de fissuras impõe um obstáculo à disseminação das tensões, resultando na concentração de tensões nos limites da fissura. Esse fenômeno pode levar ao rompimento frágil do material se a magnitude dessas tensões exceder a resistência da matriz.

Ganazini (2019), também observa que, com a incorporação de fibras em quantidades apropriadas, e desde que essas fibras possuam resistência e rigidez adequadas, o compósito deixa de exibir uma natureza marcadamente frágil, adotando um comportamento pseudo-dúctil ou não frágil.

Estudos de Shi *et al.*, (2023), mostram que amostras de concreto expandido reforçadas com fibras de polipropileno e PVA demonstraram alta resistência à compressão, bem como resistência à flexão, deflexão e tenacidade. Os resultados indicam que a influência do teor de fibras de polipropileno nas amostras foi mais significativa do que a do teor de fibras de PVA.

Buscou-se na bibliografia autores que realizaram a comparação entre ensaios de resistência para estimar as resistências à tração na flexão com base na resistência à compressão axial. Nesse contexto, foi possível estimar o valor da resistência à flexão utilizando a equação proposta por Chhorn *et al.*, (2018). O autor também define a Equação 3, que associa a resistência à compressão axial com a resistência à tração na flexão.

$$f_{ct,f} = 0,678 * (f_c)^{0,605} \quad (3)$$

Onde:

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

3 MATERIAIS E METODOS

3.1 Materiais

Na elaboração das formulações, foram utilizados elementos amplamente disponíveis na área de estudo, incluindo um aglomerante (cimento), agregados de maior granulometria (brita basáltica), substância pozzolânica (sílica ativa), aditivo superplastificante, água e fibras de polipropileno (PP).

3.1.1 Aglomerante

O aglomerante empregado foi o Cimento Portland Composto com Fíler (CP II-F32) da marca Itaú®, conforme especificações técnicas recomendadas para diversas aplicações e produzido de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018). A densidade média do cimento foi de 3,02 g/cm³, em conformidade com as diretrizes da NBR 16605 (ABNT, 2017).

Este tipo de cimento é caracterizado pela adição de 6% a 10% de fíler calcário em sua composição. Sua formulação típica inclui de 75% a 89% de clínquer, junto com gesso, além de 11% a 25% de material carbonático (Votorantim, 2020). A Tabela 2 apresenta as características físicas e químicas detalhadas do cimento.

Tabela 2 - Características físicas e químicas do cimento

Propriedades Físicas e Químicas do Cimento		Resistência Compressão Axial	Dias	fc (Mpa)
pH em Solução Aquosa	12 ≤ pH ≤ 14		1	10
Massa Específica Aparente	0,9 a 1,2g/cm ³ a 20°C		3	18
Massa Específica Absoluta	2,8 a 3,2g/cm ³ a 20°C		7	27
Solubilidade em Água	até 1,5g/l a 20°C		28	33

Fonte: Votorantim, 2020.

3.1.2 Agregado

Na formulação dos traços de concreto permeável, foi empregado agregado graúdo de origem basáltica, disponível na região de estudo. A seleção e o uso desse

material seguiram as diretrizes estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009), que define os limites de granulometria para agregados graúdos.

O agregado graúdo foi extraído de uma pedreira situada no município de Itapura, no estado de São Paulo. Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), este tipo de agregado é conhecido como brita 0 (pedrisco), e é caracterizado por sua granulometria fina e adequada para a produção de concreto permeável.

As características físicas do agregado graúdo foram avaliadas em conformidade com a NBR NM 53 (ABNT, 2009), que especifica os métodos para a determinação da massa específica e da absorção de água. Os resultados dessas medições, que incluem a massa específica e a taxa de absorção de água, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Massa específica, NBR e absorção de Água/Brita

Material	μ (g/cm ³)	Absorção (%)	Módulo de Finura	Dimensão Máxima (mm)
Agregado Graúdo	2,82 ± 0,03	2,55 ± 0,05	3,33	12,50

Fonte: Próprio autor.

3.1.3 Aditivo

Para compensar a baixa relação água/cimento na dosagem do concreto permeável, foi empregado o aditivo superplastificante Tec-Flow 7000. Este aditivo é compatível com a norma NBR 11768 (ABNT, 2019) e possui as seguintes características:

Massa específica: Aproximadamente 1,09 g/cm³

Aparência: Viscosa, com variação de cor de amarelo a âmbar

A dosagem do aditivo foi estabelecida em 0,5% em relação ao peso do cimento, seguindo o valor mínimo recomendado pelo fabricante. O fabricante sugere uma faixa de dosagem entre 0,5% e 1,5% do peso do aglomerante para obter os resultados desejados em termos de trabalhabilidade e desempenho.

3.1.4 Água

A água empregada foi obtida da rede de abastecimento da cidade de Ilha Solteira – SP, sendo originada através da captação de poços profundos no lençol freático da bacia hidrográfica de São José dos Dourados.

3.1.5 Fíbrea

Foi utilizada a macrofibra estrutural Duristeel FF54, em conformidade com a Norma ASTM C-116, para reforço no concreto permeável. As características desta macrofibra estão apresentadas na Tabela 4.

O fabricante recomenda uma dosagem mínima de 1 kg/m³ e máxima de 6 kg/m³ para melhorar a resistência à tração do concreto. Com base nessas diretrizes e considerando o volume total de 0,0157 m³ para a realização das amostras, foram adicionados os seguintes teores de macrofibra para uma análise abrangente: 1 kg/m³, 2 kg/m³, 3 kg/m³ e 4 kg/m³.

Tabela 4 - Características físicas Macro fibra Duristeel FF54

Material	Polipropileno
Módulo de Elasticidade	9,0 GPa
Peso Específico	0,97 g/cm ³
Comprimento	54 mm
Resistência a Tração	850 Mpa
Absorção de água	Zero

Fonte: Autor

3.1.6 Sílica

A sílica ativa Tecnosil foi incorporada aos traços de concreto permeável, com um acréscimo de 10% em relação ao peso do cimento. Este aditivo foi selecionado com

base em suas propriedades e nas diretrizes estabelecidas pela norma NBR 13956 (ABNT, 2012), garantindo sua conformidade e adequação para uso em concretos.

As propriedades físicas da sílica ativa utilizada estão detalhadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Características da Sílica Ativa

Características da Sílica Ativa	
Massa Específica (g/cm³)	2,22
Teor de SiO₂	≥ 90%
Superfície Específica (m²/kg)	19.000
Formato da Partícula	Esférico
Diâmetro Médio (mm)	0,0002

Fonte: Tecnosil, 2020.

3.2 Diretrizes para o Concreto Permeável

No Brasil, as diretrizes para a aplicação do concreto permeável moldado in situ são estabelecidas pela NBR 16614 (ABNT, 2015). Esta norma define as seguintes limitações e requisitos mínimos:

Coeficiente de permeabilidade mínimo (k): Deve ser superior a 1 mm/s para garantir a eficiência na drenagem de água.

Massa específica mínima (μ): Deve ser superior a 1600 kg/m³ para garantir a durabilidade e resistência estrutural adequadas do concreto.

Resistência mínima à tração por flexão ($f_{ct,f}$):

Para tráfego de pedestres: Deve ser superior a 1 MPa.

Para veículos leves: Deve ser superior a 2 MPa.

Esses critérios são fundamentais para garantir que o concreto permeável atenda aos requisitos de desempenho esperados, proporcionando drenagem eficaz e resistência estrutural adequada para as condições de uso específicas, conforme estabelecido pela norma brasileira.

3.2.1 Ensaios Mecânicos

Os seguintes ensaios foram realizados no laboratório de Engenharia Civil da FEIS/UNESP, conforme as normas técnicas brasileiras pertinentes:

Ensaios Realizados:

Resistência à compressão axial (NBR 5739, ABNT, 2018) em corpos de prova cilíndricos.

Tração por compressão diametral (NBR 7222, ABNT, 2011) em corpos de prova cilíndricos.

Tração na flexão (NBR 12142, ABNT, 2010) em corpos de prova prismáticos.

Equipamento Utilizado: Prensa universal marca Emic, com capacidade para 200 toneladas, garantindo a precisão e confiabilidade dos resultados obtidos nos ensaios.

Também foi realizado ensaio de tração na flexão (NBR 12142, ABNT, 2010) em corpos de prova prismáticos no laboratório LMCP de Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP para obtenção do módulo de elasticidade.

Normas Aplicadas: As normas NBR 5739, NBR 7222 e NBR 12142 prescrevem os procedimentos necessários para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e tração na flexão, respectivamente. Essas normas asseguram a padronização dos métodos de teste e a obtenção de resultados consistentes e comparáveis.

Tipos de Corpos de Prova:

Para ensaios de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral, foram confeccionados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura.

Para ensaios de tração na flexão, módulo de elasticidade e módulo de tenacidade, foram preparados corpos de prova prismáticos com dimensões de 100 mm de largura, 100 mm de altura e 400 mm de comprimento, conforme mostrado na Figura 8.

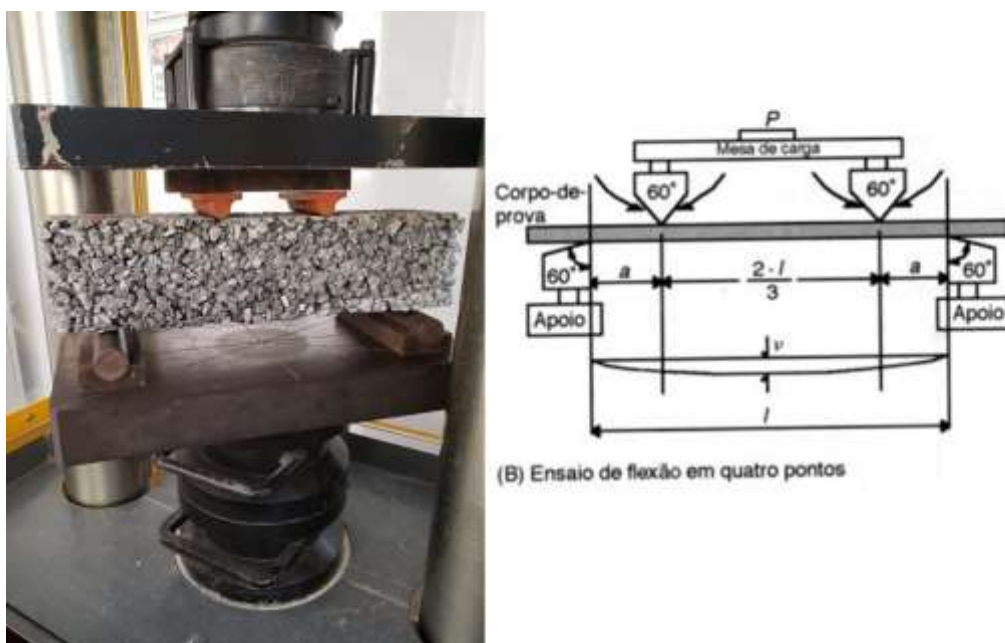
Figura 8 – Corpos de prova



Fonte: Próprio autor.

Os ensaios de tração na flexão seguiram a NBR 12142 (2010) - Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismática, e foram realizados ensaios de tração na flexão (4 pontos), como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Ensaio de Flexão



Fonte: Próprio autor.

Ensaio para obtenção do módulo de elasticidade foram realizados por meio de testes de tração na flexão, seguindo a norma NBR 12142 (2010) - Concreto: Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.

Os ensaios de tração na flexão foram conduzidos em quatro cutelos, conforme ilustrado na Figura 10. Para a obtenção dos valores de deformação, foi utilizado um transformador diferencial linear variável (LVDT - *Linear Variable Differential Transformer*) e a velocidade do ensaio foi de 0,2mm/min.. Este dispositivo é fundamental para medir com precisão a flecha ocorridas no centro do corpo de prova durante o ensaio.

Figura 10 – Ensaio de tração na flexão



Fonte: Próprio autor.

A obtenção do módulo de elasticidade (E) foi de acordo a norma ASTM – E855-90, utilizando a equação 4 para ensaios de tração na flexão à 4 pontos.

(4)

$$E = \frac{Pa(3L^2 - 4a^2)}{4bh^3v}$$

Onde:

E = Módulo de Elasticidade (E) (GPa)

P = Carga a 70% da ruptura (kN)

L = Vão dos apoios até aplicação da carga (mm)

a = Base da seção transversal (mm)

h = Altura da seção transversal (mm)

v = deflexão no meio do vão (mm)

Para efeito de comparação, será utilizado o método linear para a obtenção dos valores do módulo de elasticidade, utilizando a equação 5, conforme determinado por Goede (2009).

Esta equação 5 estabelece uma correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do material, permitindo a estimativa do comportamento elástico dos elementos analisados.

(5)

$$E = 39,1 \cdot \rho_c^{1,5} \sqrt{f_c}$$

Onde:

E = Módulo de elasticidade (MPa);

ρ_c = Massa específica do concreto (kg/m³);

f_c = Resistência à compressão do concreto (MPa);

3.2.2 Massa Específica Aparente

Para determinar a massa específica aparente no estado fresco do concreto permeável, este estudo seguiu as diretrizes estabelecidas na norma ASTM C1688/C1688M - 14^a, com adaptações específicas devido à disponibilidade de equipamentos no laboratório.

Devido à falta dos recipientes cilíndricos recomendados na norma ASTM, optou-se por utilizar corpos de prova cilíndricos moldados da mesma forma que os utilizados

nos ensaios mecânicos e de permeabilidade. Esse procedimento foi escolhido para assegurar a consistência nos métodos de preparação e adensamento do concreto.

Os corpos de prova foram moldados e pesados imediatamente após o processo de adensamento e nivelamento. A massa específica aparente no estado fresco foi então calculada dividindo-se a massa do concreto pelo volume do corpo de prova, conforme demonstrado na Equação 6:

$$D = \frac{M_t - M_r}{V_r} \quad (6)$$

Onde:

D – Massa específica aparente;

M_t – Massa total;

M_r – Massa do recipiente;

V_r – Volume do recipiente.

Este método permitiu a análise precisa da massa específica aparente do concreto permeável, garantindo que os resultados atendessem aos requisitos mínimos estabelecidos pela norma ABNT NBR 16416 (2015) para esse tipo de material.

3.2.3 Percentual de Vazios

Para determinar a densidade teórica e a porcentagem de vazios do concreto permeável, este estudo seguiu as diretrizes estabelecidas na norma ASTM C1688/C1688M - 14^a (ASTM, 2014), adaptadas às condições específicas do laboratório.

Equação para a Densidade Teórica (Equação 7):

$$T = \frac{M_s}{V_s} \quad (7)$$

Onde:

T – Densidade teórica;

M_s – massa total somada de todos os materiais adicionados na mistura;

V_s – é a soma dos volumes de cada material componente na mistura divididos pelas suas respectivas massas específicas (m^3).

Esta equação é utilizada para calcular a densidade teórica do concreto, considerando todas as massas de componentes adicionados na mistura e seus respectivos volumes, com base nas massas específicas dos materiais.

Equação para a Porcentagem de Vazios (Equação 8):

$$U = \frac{T-D}{T} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

U é a porcentagem de vazios (%),

T é a densidade teórica calculada na Equação 5 (kg/m^3),

D é a massa específica aparente no estado fresco, obtida na Equação 4 (kg/m^3).

Essa equação calcula a porcentagem de vazios no concreto permeável, sendo um índice multiplicado por 100 para expressar em porcentagem. Os vazios são determinados considerando a diferença entre a densidade teórica e a massa específica aparente no estado fresco.

3.2.4 Ensaio de Permeabilidade: Procedimentos e Cálculo do Coeficiente

Para o estudo de permeabilidade, foram confeccionados cinco corpos de prova (CP) para cada mistura de referência, $1Kg/m^3$, $2Kg/m^3$, $3Kg/m^3$ e $4Kg/m^3$. Diversas metodologias podem ser utilizadas para determinar o coeficiente de permeabilidade; no presente estudo, optou-se pelo ensaio descrito na norma ISO 17785-1 (ISO, 2016), conforme documentado por Haselbach et al. (2017). Este método é uma adaptação do ensaio ASTM C1701 (ASTM, 2017), modificado para a análise de amostras cilíndricas e núcleos extraídos de pavimentos em condições laboratoriais.

O procedimento do ensaio é relativamente simples. Os corpos de prova cilíndricos são cobertos com um filme plástico retrátil transparente, que se ajusta à superfície irregular e se estende pelo menos 5 cm além do topo, formando uma aba. Durante o ensaio, são derramados 2 litros de água sobre o topo do corpo de prova, mantendo uma camada de água com espessura entre 1,5 e 2,5 cm para assegurar

um fluxo predominantemente vertical. Recomenda-se pré-umedecer a estrutura porosa com 1 litro de água antes do início do ensaio. O tempo necessário para que os 2 litros de água escoem completamente através do sistema é registrado. A contagem do tempo começa no momento em que a água começa a ser despejada e termina quando a água na superfície do topo desaparece, conforme ilustrado na Figura 11.

O coeficiente de permeabilidade é calculado a partir da Equação 9, onde a correção do gradiente hidráulico é desprezada devido à presença mínima de coluna de água. A fórmula utilizada é:

$$K = \frac{m}{a.t} \quad (9)$$

Onde:

m = massa da água (em cm³)

a = área do cilindro do corpo de prova (em cm²)

t = tempo que o volume de água levou para percorrer o corpo de prova (em segundos)

Figura 11 - Ensaio de Permeabilidade



Fonte: Próprio autor.

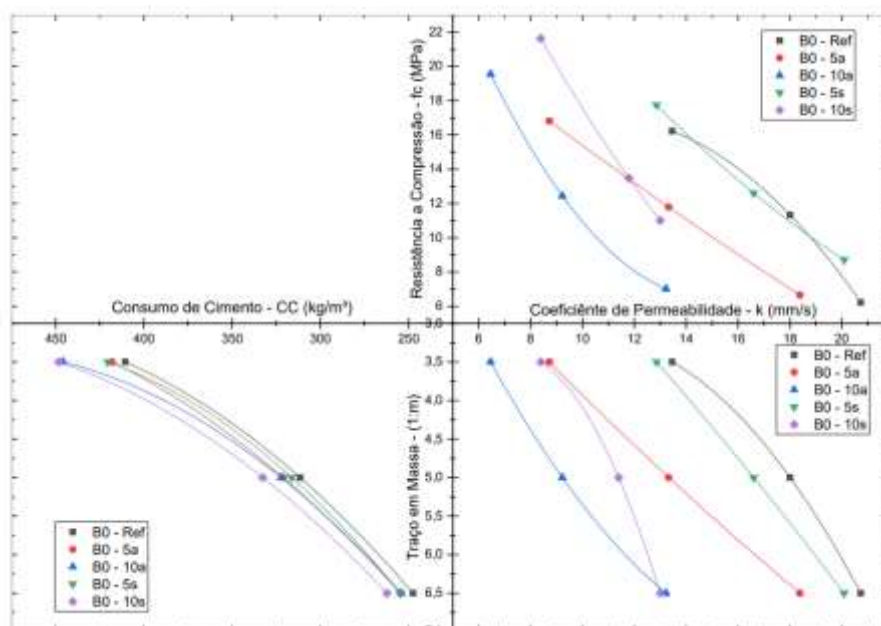
3.3 Traço

Segundo Bigotto (2021), o desenvolvimento de um diagrama de dosagem adaptável para o concreto permeável é essencial para a seleção de uma proporção de componentes que satisfaça tanto os requisitos mínimos de coeficiente de permeabilidade estabelecidos pelo projeto quanto a capacidade de suportar o tráfego previsto.

A maioria dos estudos focados em concretos permeáveis enfatiza a otimização da resistência mecânica do material. No entanto, dado o uso restrito deste material em aplicações específicas, é crucial garantir que sua característica distintiva — a permeabilidade — não seja comprometida.

Para assegurar o cumprimento dos pré-requisitos de permeabilidade, o traço utilizado deve ser cuidadosamente definido, uma vez que este pode influenciar diretamente tanto as propriedades mecânicas quanto a permeabilidade do concreto. O presente estudo utilizou como referência o Diagrama de Dosagem de Bigotto (2021), para brita zero com 10% de sílica (B0 – 10s), apresentado na Figura 12, a fim de obter o traço adequado do concreto permeável.

Figura 12 - Diagrama de Dosagem



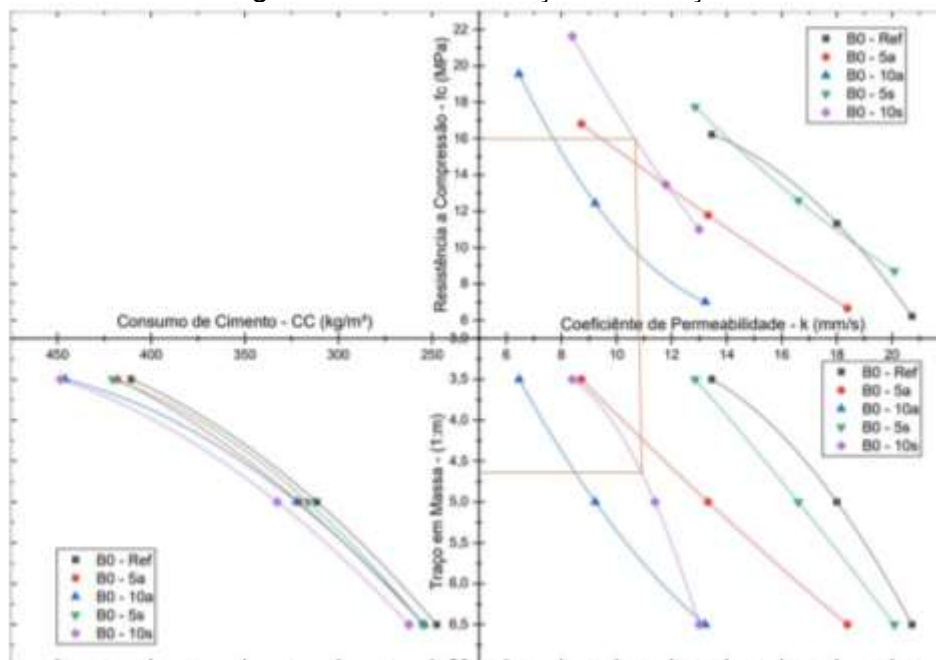
Fonte: Bigotto, 2021.

Embora o índice de vazios esteja diretamente relacionado à permeabilidade do concreto, não há um limite normativo específico para essa característica. Estudos, como o de Tennis *et al.* (2004), recomendam uma faixa de índice de vazios entre 15% e 25%.

A determinação do índice de vazios foi realizada de acordo com a norma NBR 8953 (ABNT, 2015), que define o cálculo com base na relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. Neste estudo, foi adotada a faixa de 15% a 25%, pois índices abaixo de 15% podem comprometer a permeabilidade do concreto, enquanto índices acima de 25% podem prejudicar sua resistência estrutural.

O traço de concreto foi determinado considerando o coeficiente de permeabilidade desejado e analisando a variação de um traço médio, que vai desde um traço pobre (pouco cimento) até um traço rico (muito cimento). Foi incorporada uma adição de 10% de sílica ativa e estabelecido um coeficiente de permeabilidade alvo de 11 mm/s. Com base no Diagrama de Dosagem, mostrado na Figura 13, o traço 1:4,6 foi selecionado para este estudo.

Figura 13 - Determinação do Traço



Fonte: Adaptado de Bigotto, 2021.

O coeficiente de permeabilidade é um parâmetro fundamental para avaliar a taxa de fluxo de água através de elementos ou estruturas permeáveis, sendo crucial na

análise de concretos porosos. Esses concretos são desenvolvidos para atender a requisitos ambientais específicos da região onde o pavimento será instalado.

Ao longo do tempo, a permeabilidade do concreto pode ser reduzida devido ao acúmulo de partículas sólidas transportadas pela água e pelo ar. Este acúmulo tende a obstruir os poros do concreto, diminuindo gradualmente sua capacidade de permitir a passagem da água. Para garantir que o pavimento permaneça dentro dos padrões de desempenho ao longo de sua vida útil, recomenda-se projetá-lo com um coeficiente de permeabilidade superior ao mínimo exigido, que é de 1 mm/s.

A Tabela 6 apresenta o traço de referência e os traços modificados com a adição de fibras, detalhando as composições específicas adotadas neste estudo.

Tabela 6 - Misturas Elaboradas em Massa

Nomenclatura	Cimento (Kg)	Brita (Kg)	Fibra (Kg)	Sílica	Água	SP
Referência	7,6	34,96	0	0,76	2,13	0,038
1Kg/m³	7,6	34,96	0,0418	0,76	2,13	0,038
2Kg/m³	7,6	34,96	0,0627	0,76	2,13	0,038
3Kg/m³	7,6	34,96	0,0784	0,76	2,13	0,038
4Kg/m³	7,6	34,96	0,0942	0,76	2,13	0,038

Fonte: Próprio autor.

3.4 Modo de Preparo

Para garantir a uniformidade dos agregados utilizados, todos foram submetidos a um processo de secagem ao sol por um período mínimo de 3 dias. Esse procedimento visou assegurar a evaporação completa da umidade superficial e reduzir a umidade dos materiais a níveis próximos de zero. Antes da elaboração de cada traço de concreto, foi realizado um ensaio específico para medir a umidade residual dos agregados antes de serem incorporados à mistura.

A abordagem de mistura seguiu uma adaptação do método proposto por Bigotto (2021), com modificações na adição de água e no tempo de parada da betoneira. O processo de mistura foi conduzido em etapas específicas:

- a. Lavagem da betoneira;
- b. Espera de 2 minutos com a boca da betoneira voltada para baixo para remover o excesso de água;

- c. Adição dos agregados e da água de absorção;
- d. Mistura por 1 minuto;
- e. Adição do cimento, da sílica e da água de hidratação;
- f. Mistura por 2 minutos;
- g. Parada da mistura para limpeza das paredes da betoneira por 30 segundos;
- h. Adição do superplastificante;
- i. Mistura por 2 minutos;
- j. Adição das fibras;
- k. Mistura por 2 minutos;
- l. Parada para análise do traço e finalização.

Todas as misturas foram preparadas em dias de condições climáticas semelhantes (ensolarados) e no mesmo horário (por volta das 14h). A moldagem dos corpos de prova seguiu uma adaptação do método recomendado pela NBR 5738 (ABNT, 2015), devido à especificidade do concreto de abatimento igual a zero.

Os corpos de prova foram moldados em duas camadas aproximadamente iguais, seguidas pela camada de acabamento. As duas primeiras camadas foram compactadas com quinze golpes de uma haste metálica e vibradas por dez segundos cada. A camada de acabamento consistiu no preenchimento do volume restante, seguido de adensamento e nivelamento da superfície utilizando a haste metálica como um rolo.

Após a moldagem e compactação, todos os corpos de prova foram cobertos com filme plástico para evitar perda de água e mantidos em um ambiente fechado, protegido da exposição direta ao sol, por pelo menos 24 horas. Após esse período, os corpos de prova foram identificados e transferidos para uma câmara úmida conforme as diretrizes da NBR 5738 (ABNT, 2015), sendo mantidos a uma temperatura de aproximadamente $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa média de 95%.

No dia da ruptura dos corpos de prova (28 dias), eles foram retirados da câmara úmida e deixados em repouso por cerca de 1 hora para permitir a evaporação da água superficial antes do capeamento. Após essa etapa, os corpos de prova foram novamente colocados na câmara úmida até o momento da ruptura, que ocorreu no mesmo dia.

Optou-se pelo uso de enxofre para o capeamento dos corpos de prova, como ilustrado na Figura 11, devido aos seus resultados superiores em termos de resistência e menor dispersão nos resultados. Esse método apresentou o menor coeficiente de variação, conforme demonstrado por Bigotto (2021).

Figura 14 - Capeamento



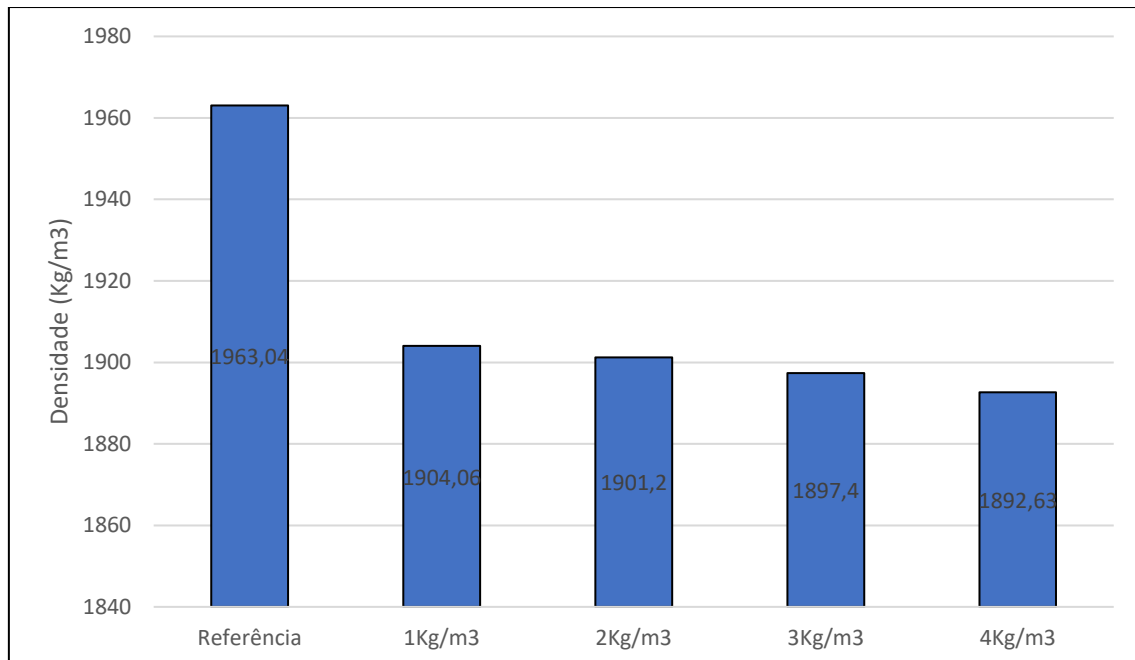
Fonte: Próprio autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Densidade e Índice de Vazios

Para a análise da densidade e do índice de vazios, foram preparados cinco corpos de prova (CP). A Figura 15 apresenta os valores médios de densidade obtidos para os corpos de prova de referência e para aqueles com adição de fibras. A Tabela 7 apresenta os valores tanto os médios das diferentes misturas, acompanhados da análise estatística, incluindo o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV).

Figura 15 - Densidade



Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 - Densidade

Traço	Densidade (Kg/m ³)	CV (%)	DP (Kg/m ³)
Referência	1963,04	1,42	27,82
1Kg/m³	1904,06	1,61	30,78
2Kg/m³	1901,20	1,55	29,57
3Kg/m³	1897,4	1,49	30,12
4Kg/m³	1892,63	1,53	28,91

Fonte: Próprio autor.

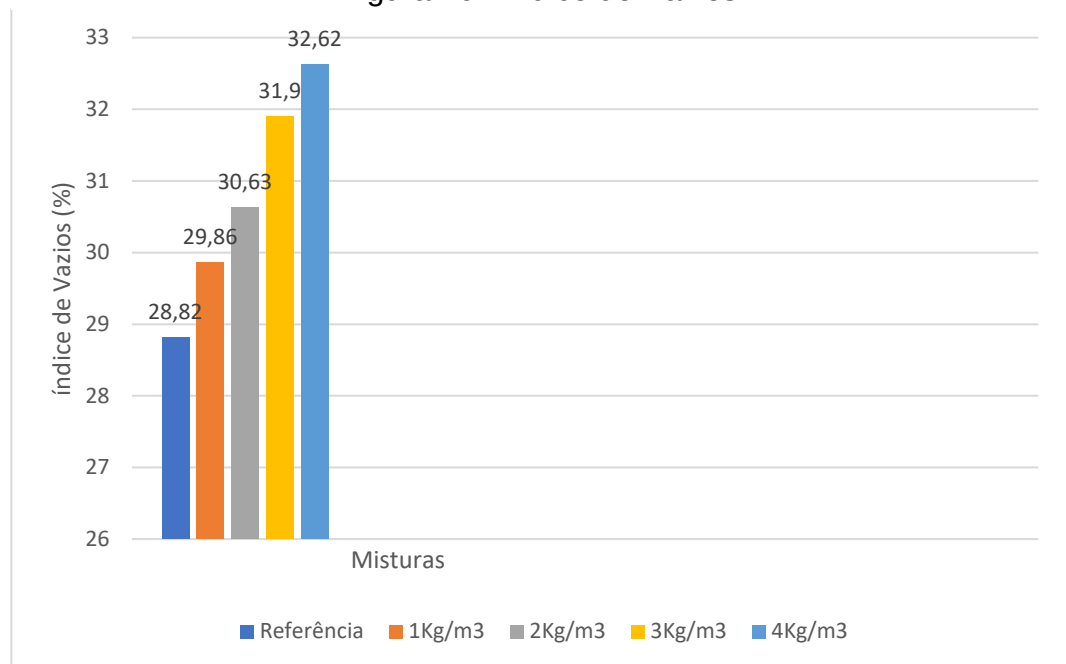
Os resultados indicaram que a massa específica aparente seca das amostras de concreto permeável endurecido variou entre 1900 e 1970 kg/m³. Este intervalo está em conformidade com os valores relatados por Batezini (2013), para concretos permeáveis, que variam de 1700 a 2000 kg/m³. Notavelmente, o concreto permeável possui uma massa específica aproximadamente 80% da do concreto comum, que é em torno de 2400 kg/m³.

Ambas as misturas, tanto a de referência quanto aquelas com adição de fibras, apresentaram densidades superiores a 1600 kg/m³, atendendo ao mínimo exigido pela norma NBR 16416 (ABNT, 2015). Este requisito é fundamental para assegurar que o concreto permeável possua a densidade necessária para suas aplicações estruturais.

A Tabela 6 demonstra que os coeficientes de variação (CV) dos resultados foram inferiores a 2%. Este baixo valor de CV sugere que o método empregado na elaboração dos traços foi eficiente, resultando em uma variabilidade mínima e confirmando a consistência e a uniformidade das misturas. A consistência nos valores de densidade reflete uma boa homogeneidade na mistura e incorporação das fibras.

A Figura 16 apresenta os resultados médios obtidos para o índice de vazios do concreto permeável com e sem adição de fibras e a Tabela 8 a análise estatística (CV e DP). Este índice é crítico para avaliar a eficácia do concreto permeável em permitir o fluxo de água através de sua matriz, mantendo a funcionalidade esperada em aplicações de pavimentos permeáveis.

Figura 16 - índice de Vazios



Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 - índice de Vazios.

Traço	Índice de Vazios (%)	CV (%)	DP (Kg/m³)
Referência	28,82	2,02	1,42
1Kg/m³	29,86	1,61	2,46
2Kg/m³	30,63	1,55	1,93
3Kg/m³	31,9	1,93	1,7
4Kg/m³	32,62	1,71	2,12

Fonte: Próprio autor.

O índice de vazios das misturas analisadas foi superior a 15%, alinhando-se com as recomendações da literatura para concretos permeáveis, como sugerido por Tennis *et al.*, (2004). O índice de vazios do concreto permeável, segundo a *American Concrete Institute* (ACI, 2010), deve variar entre 15% e 25% para manter a funcionalidade de drenagem.

No presente estudo, o traço de referência apresentou um índice de vazios acima da média, com um valor de 28,8%. Com a adição de 1 kg/m³ de fibra, o índice de

vazios aumentou para 29,86%. Aumentando a adição para 2 kg/m³, o índice de vazios subiu para um valor médio de 30,63%. Nas misturas com adição de 3Kg/m³ e 4Kg/m³ os resultados aumentam para 31,9% e 32,62%.

Conforme esperado, a adição de fibra de polipropileno nas misturas de concreto permeável resultou em um aumento no percentual do índice de vazios das amostras. Este fenômeno pode ser explicado pela formação de espaços de ar adicionais entre os agregados e as fibras, que não são preenchidos pelo cimento hidratado. Toghroli *et al.*, (2020), discutem que o aumento do índice de vazios em concretos permeáveis decorre do acúmulo de ar na matriz do concreto, especialmente nas interfaces entre a mistura cimentícia e as fibras de polipropileno.

Este aumento no índice de vazios é consistente com a literatura e reflete a influência das fibras na estrutura porosa do concreto permeável. A presença de fibras proporciona canais adicionais para a retenção de ar, contribuindo para a elevação do índice de vazios e, potencialmente, influenciando a permeabilidade e outras propriedades físicas do concreto.

4.2 Permeabilidade

Para cada corpo de prova, o ensaio de permeabilidade foi realizado duas vezes, e a média dos tempos foi calculada para cada amostra. Os valores médios dos coeficientes de permeabilidade (K) foram determinados conforme a Equação 7 e estão apresentados na Tabela 9.

Philip *et al.*, (2023), que destacam que a adição de fibras reduz significativamente a permeabilidade nas amostras de concreto permeável, devido à distribuição irregular das fibras nos poros do concreto. Essa distribuição irregular resulta na formação de poros mais fechados e compactos, dificultando a passagem da água através da matriz.

Tabela 9 - Coeficiente de Permeabilidade

Mistura	Coeficiente de Permeabilidade (mm/s)	Desvio Padrão (DV) (%)	Coeficiente de Variância (CV) %
Referência	9,84	6,35	22,83
1Kg/m ³	11,06	4,3	18,6
2Kg/m ³	11,56	2,67	13,33
3Kg/m ³	12,03	4,65	14,68
4Kg/m ³	12,65	3,18	13,94

Fonte: Próprio autor.

A mistura referência proposta demonstrou excelentes capacidades drenantes, apresentando um coeficiente de permeabilidade de 9,83 mm/s. Segundo Elango *et al.*, (2021), o concreto permeável ideal deve possuir um coeficiente de permeabilidade na faixa média de 2 a 8 mm/s.

Para projetos envolvendo concreto permeável, é crucial analisar o coeficiente de permeabilidade mínimos, devido à importância fundamental do material em termos de sua capacidade de drenagem eficiente.

Ao analisar o Diagrama de Dosagem utilizado para obtenção do traço (Figura 10), se observa que o valor obtido para o traço referência (9,83 mm/s) está próximo da capacidade drenante esperada dos corpos de prova do ensaio conforme o diagrama (11 mm/s).

4.3 Compressão Axial

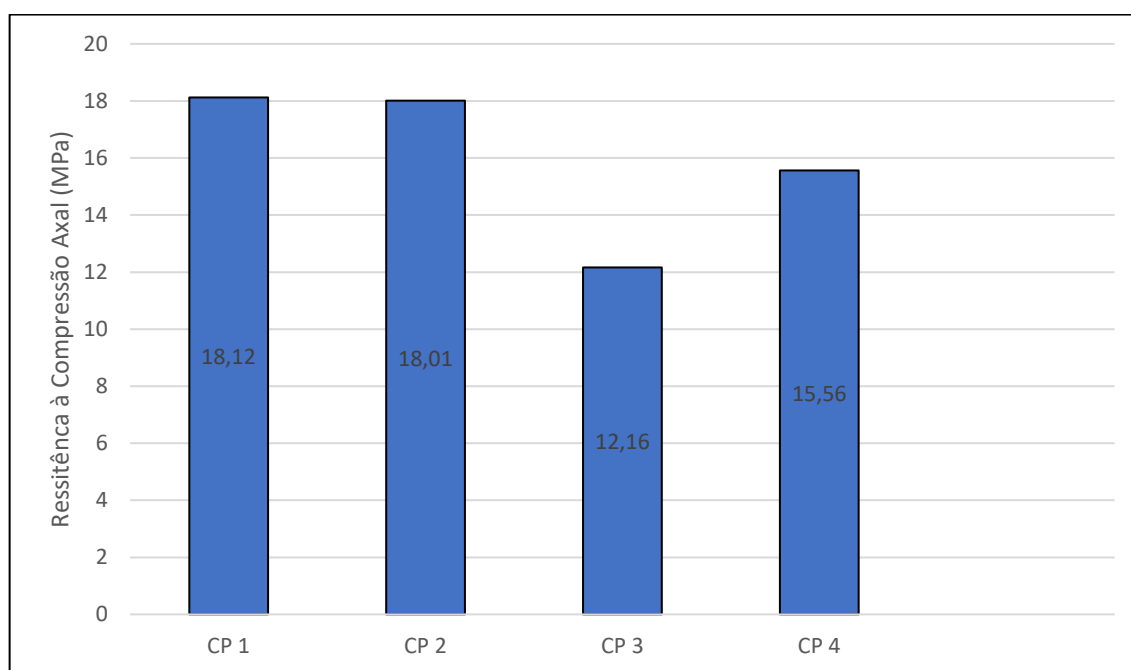
Os ensaios mecânicos foram realizados aos 28 dias, incluindo ensaios de resistência à compressão axial, compressão diametral e flexão em três e quatro pontos, nas misturas de concreto permeável com e sem fibra de polipropileno.

A avaliação dos resultados de resistência mecânica foi conduzida em conformidade com as normas vigentes no Brasil. Nesse contexto, todas as comparações foram realizadas com foco na adequação das misturas para tráfego de veículos leves e/ou pedestres.

Utilizando a resistência à tração na flexão estipuladas pela NBR 16416 (ABNT, 2015) (2 MPa para veículos leves e 1 MPa para pedestres), foi possível estimar valores mínimos de resistência à compressão axial, utilizando a equação 3, de 16 MPa para veículos leves e 7 MPa para pedestres.

A resistência à compressão axial obtida para a mistura de referência está apresentada na Figura 17.

Figura 17 - Resistência a Compressão Axial – Referência

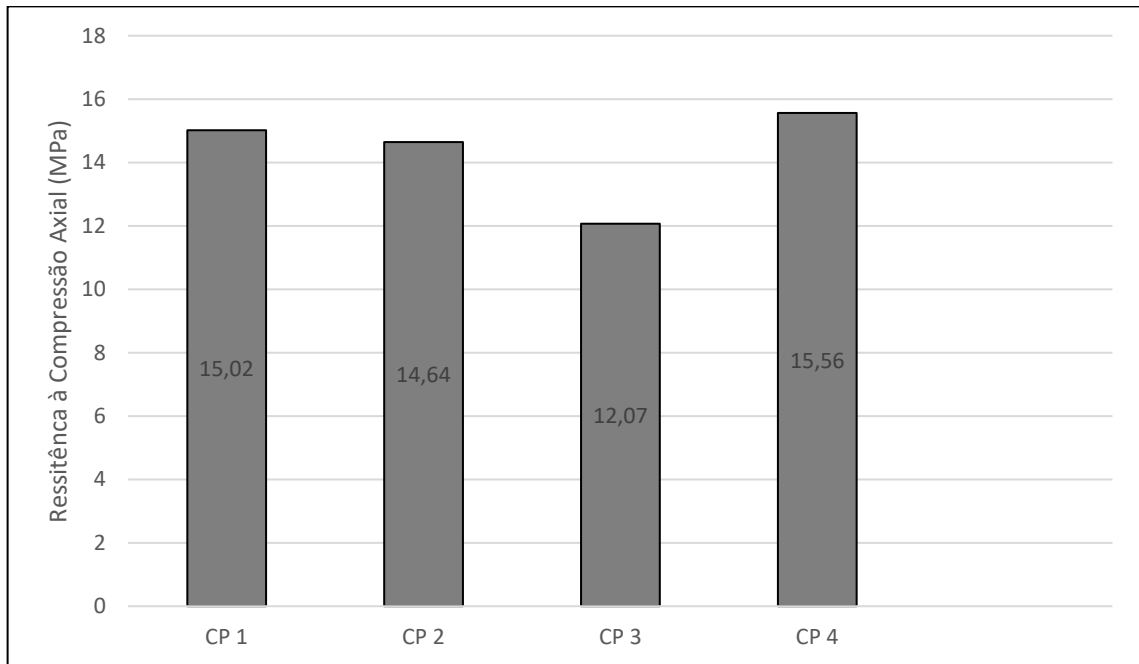


Fonte: Próprio autor.

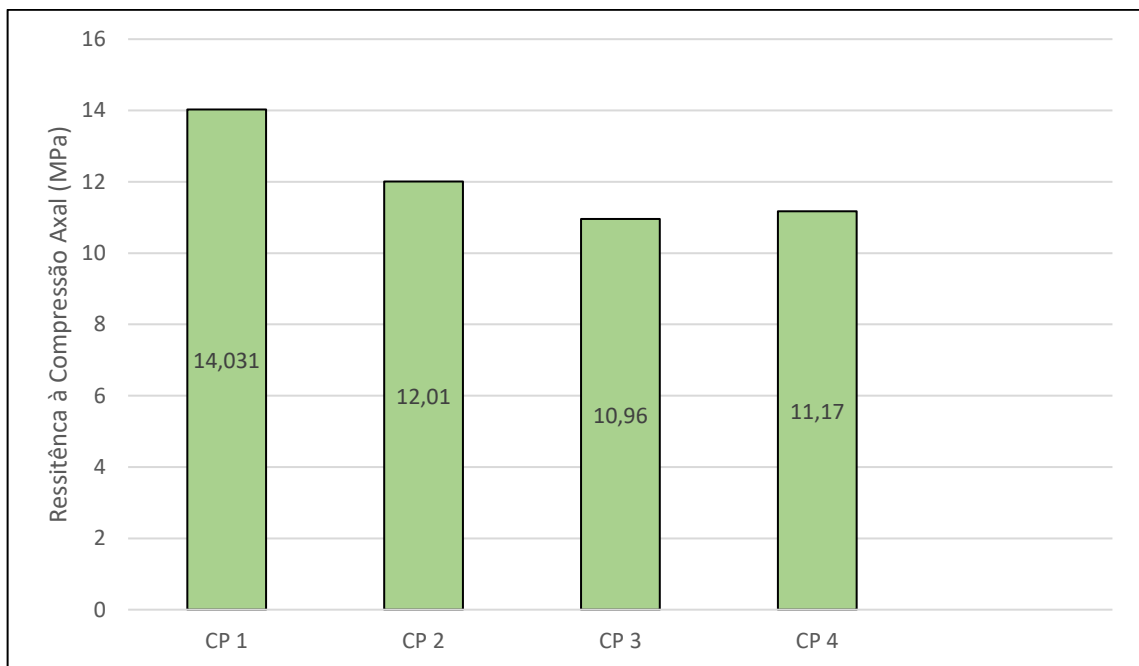
Observou-se na mistura de referência um valor médio de 15,96 MPa de resistência à compressão axial, com desvio padrão de 3,84 MPa.

No ensaio de compressão axial, o traço proposto através do Diagrama de Dosagem obteve um resultado semelhante ao previsto no diagrama, mostrando que o método empregado nesta pesquisa atendeu aos objetivos.

As Figuras 18, 19, 20 e 21 apresentam os resultados de compressão axial para as misturas com adição de 1 kg/m³, 2 kg/m³, 3 kg/m³ e 4 kg/m³ de fibra de polipropileno, com médias e desvios padrões de 14,32 ± 1,34 MPa , 12,04 ± 1,21 MPa, 9,85 ± 0,46 Mpa e 10,08 ± 0,1 Mpa, respectivamente.

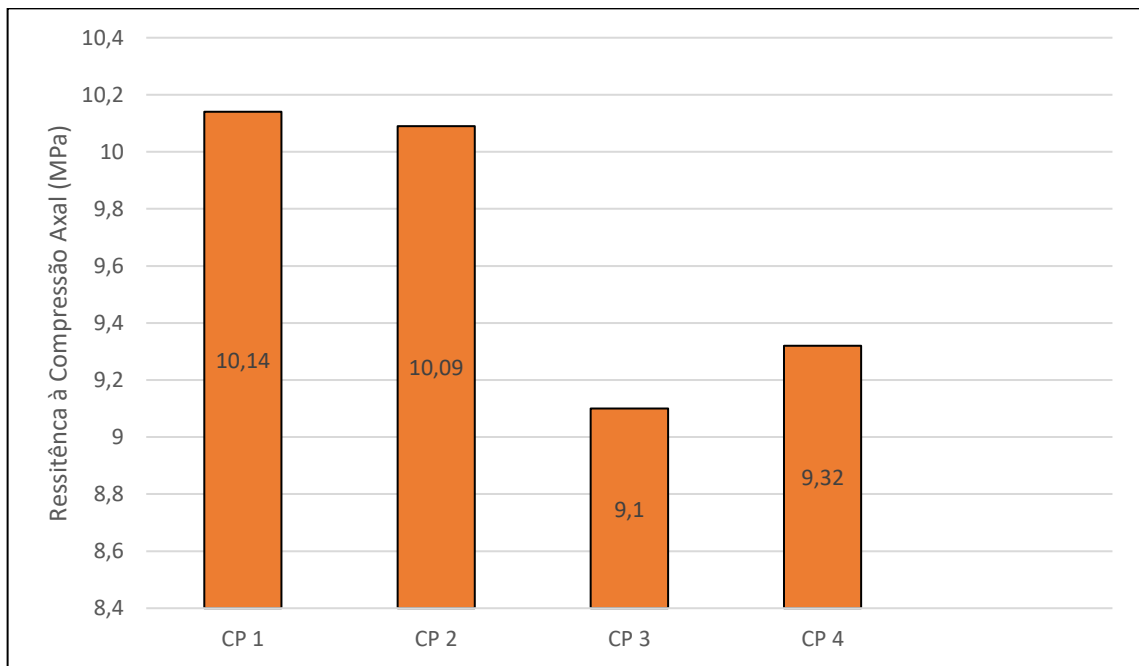
Figura 18 - Resistência a Compressão Axial – 1Kg/m³ Fibra

Fonte: Próprio autor.

Figura 19 - Resistência a Compressão Axial – 2Kg/m³ Fibra

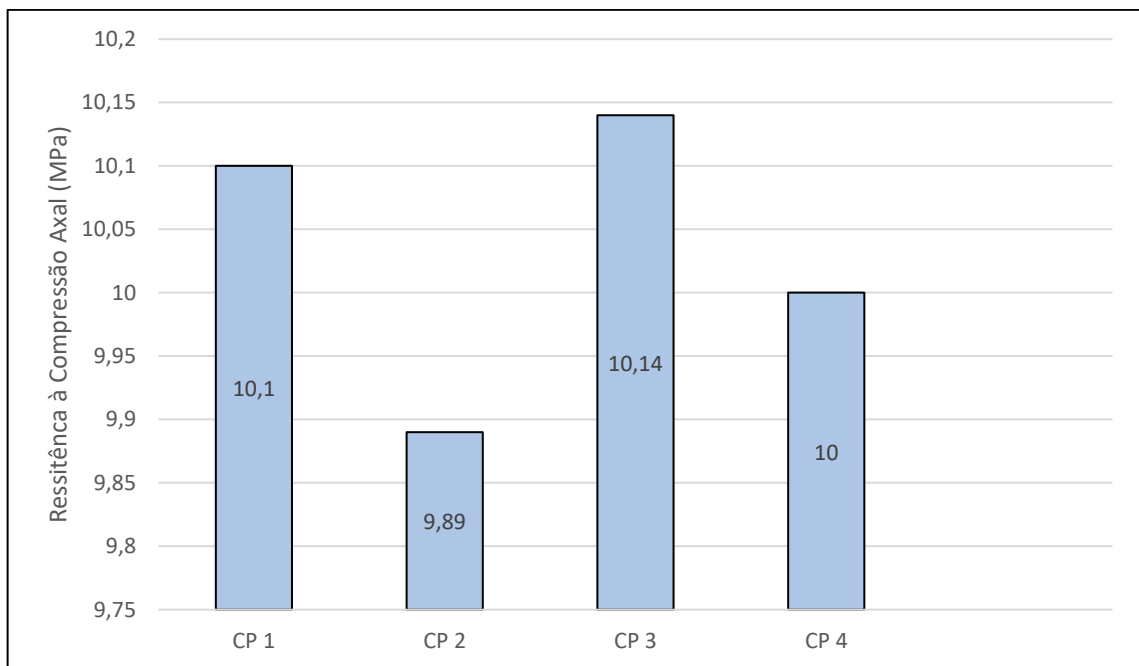
Fonte: Próprio autor.

Figura 20 - Resistência a Compressão Axial – 3Kg/m3 Fibra



Fonte: Próprio autor.

Figura 21 - Resistência a Compressão Axial – 4Kg/m3 Fibra

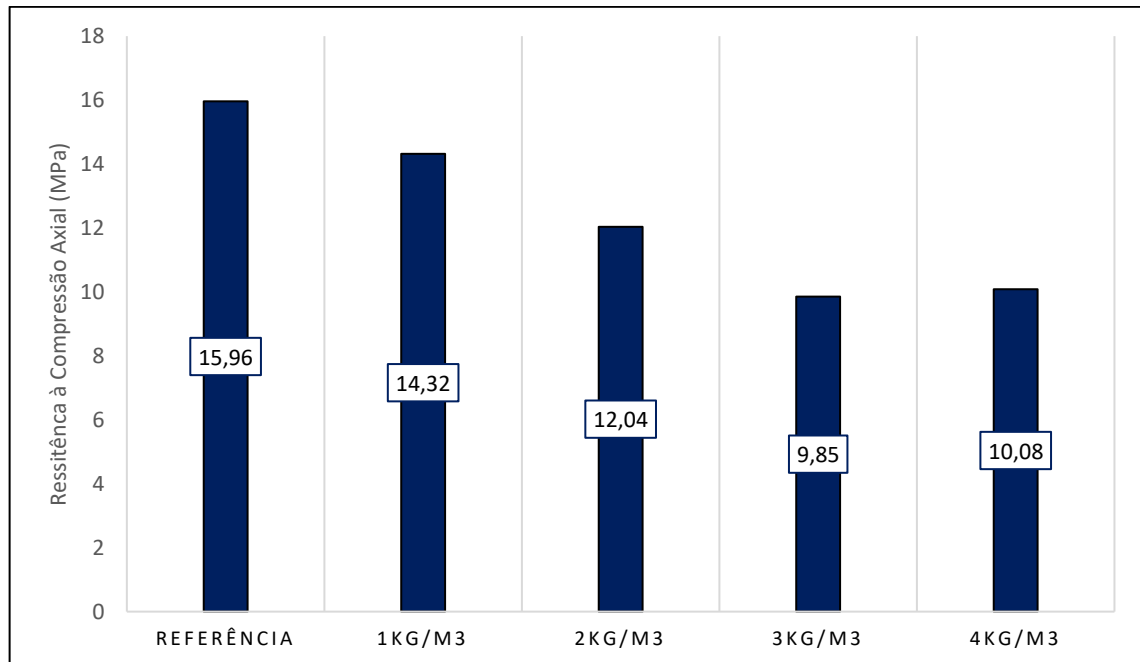


Fonte: Próprio autor.

Conforme ilustrado na Figura 22, a mistura de referência apresentou a maior resistência à compressão axial em comparação com as demais amostras contendo

adição de fibra de polipropileno. Isso indica que a adição de fibra não contribuiu para o aumento da resistência à compressão axial da mistura.

Figura 22 - Resistência a Compressão Axial



Fonte: Próprio autor.

Foi realizada a análise de variância (ANOVA) para comparar as médias de três ou mais grupos independentes, com o objetivo de determinar se há diferenças estatisticamente significativas entre eles. Esta análise avalia a variação entre os grupos e dentro dos grupos, fornecendo informações sobre a significância das diferenças observadas, como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 - ANOVA - Compressão Axial

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFERÊNCIA	4	63,85	15,9625	7,82269
1Kg/m3	4	57,29	14,3225	2,39749
2Kg/m3	4	48,17	12,0425	1,96143
3Kg/m3	4	38,65	9,6625	0,28149
4Kg/m3	4	40,13	10,0325	0,01249

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	118,456	4	29,6141	11,8688	0,00015	3,05557
Dentro dos grupos	37,4268	15	2,49512			
Total	155,883	19				

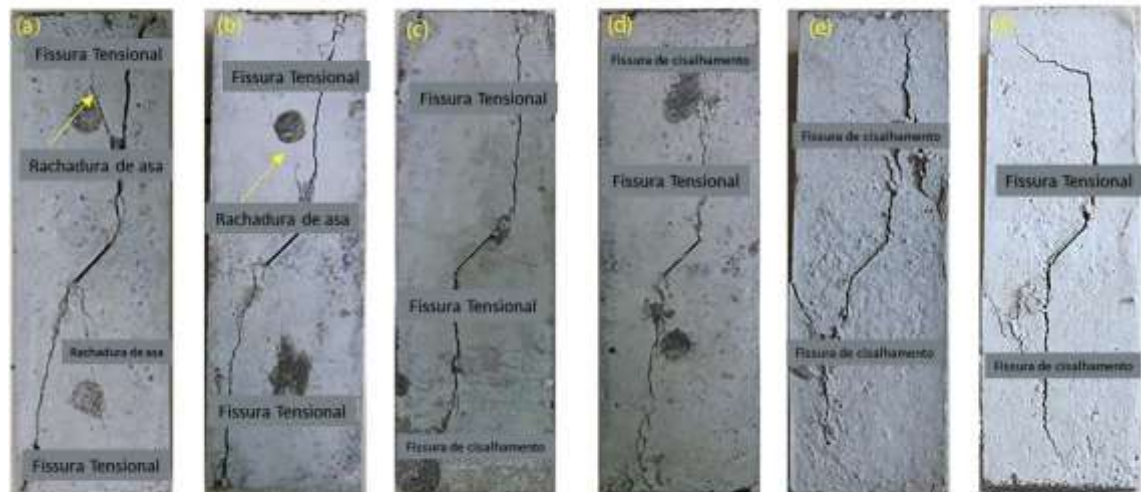
Fonte: Próprio autor.

Observa-se que o valor de F (11,86) é maior do que o valor de F-crítico (3,05), e o valor de P é menor do que 0,05. Portanto, é possível assumir que a hipótese nula não é válida, indicando que há uma diferença estatisticamente significativa entre as misturas.

Zhang *et al.*, (2024) analisaram, por ensaio de fratura, como a fibra de polipropileno influencia a propagação de fissuras em concreto convencional com entalhe pré-existent sob condições de carga uniaxial. Os resultados mostram que as fibras iniciam e propagam fissuras, alteram o modo de ruptura das amostras e afetam a tensão de início de trinca e a resistência de pico.

O aumento na quantidade de fibra retarda o início da trinca e prolonga o tempo até a falha, como ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Resultados experimentais de amostras com diferentes teores de fibra de Polipropileno



Fonte: Zhang, *et al.*, 2024.

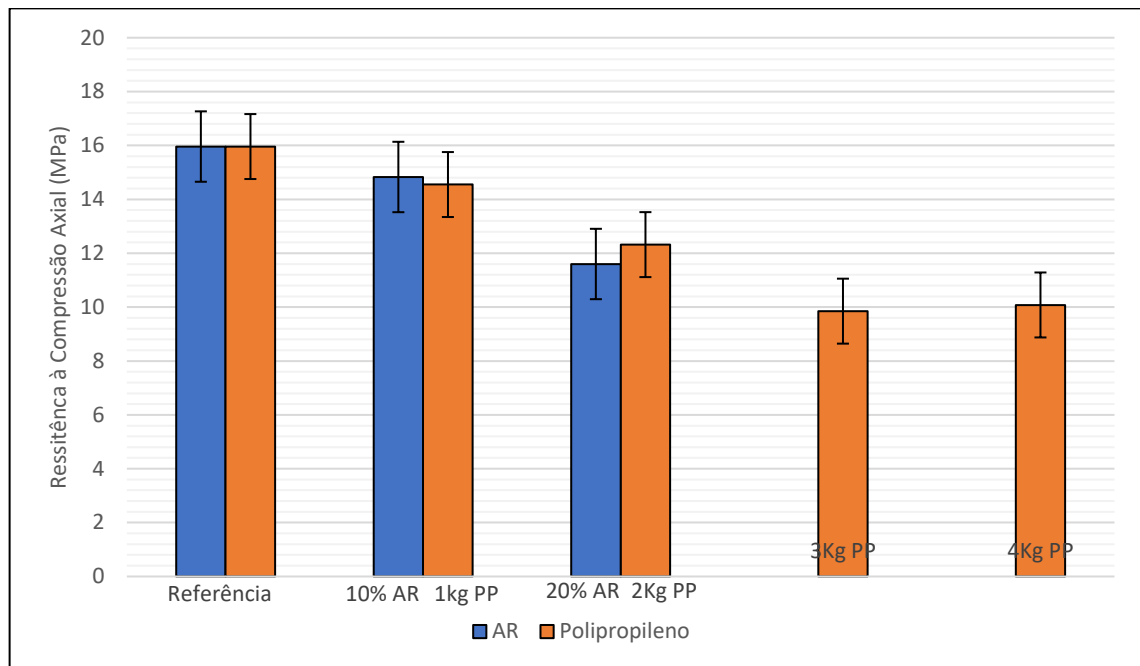
Na Figura 23(a), durante o estágio inicial de carga sem a adição de fibras de polipropileno, são visíveis fissuras de tensão simétricas nas extremidades superior e inferior das fissuras existentes na amostra. À medida que as fissuras se propagam lateralmente, surgem novas fissuras de tensão nas extremidades das fissuras existentes.

Na Figura 18(b), durante o estágio inicial de carga com um teor de fibra de polipropileno de 1 kg/m³, a fissura de tensão na extremidade da trinca ainda está presente, porém é consideravelmente mais curta do que na amostra sem fibra de polipropileno.

Os resultados mostraram que uma quantidade adequada de fibra pode efetivamente inibir a propagação de fissuras existentes, enquanto o excesso de fibra pode reduzir a área de suporte eficaz e enfraquecer suas propriedades compressivas.

Santana (2024), avaliou a inclusão de fibras de vidro (AR) em concreto permeável, utilizando o mesmo traço. A Figura 24 traz um comparativo entre os resultados da adição de fibra de vidro e de polipropileno (PP).

Figura 24 - Resistência a Compressão Axial - Fibra de vidro (AR) x Polipropileno



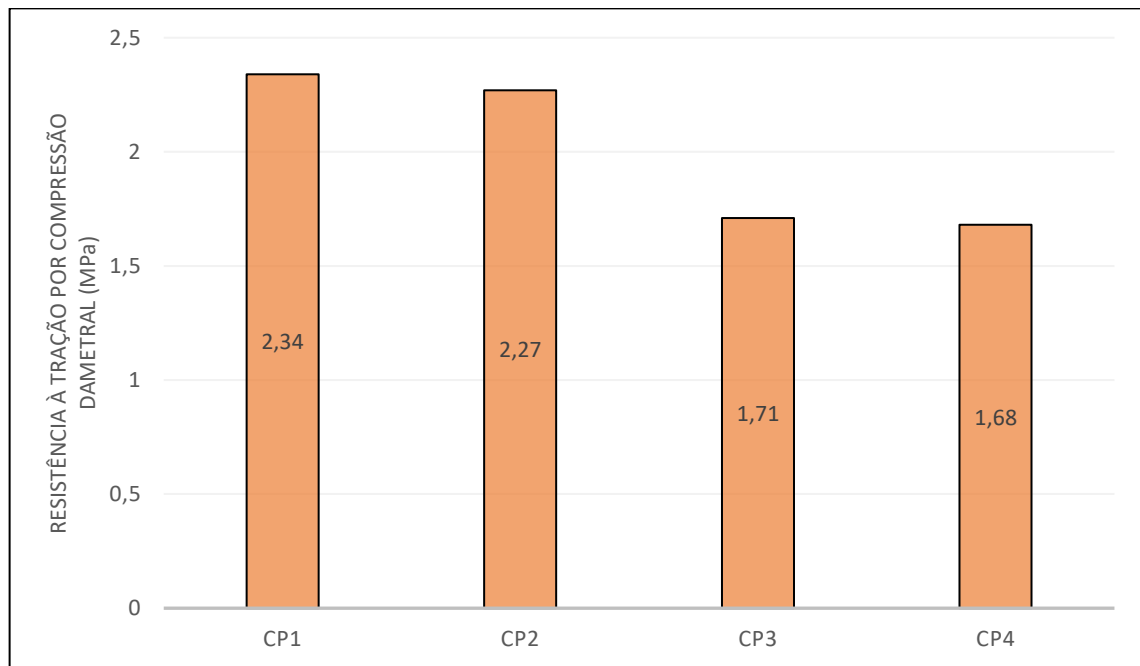
Fonte: Próprio autor.

Essa redução, na resistência à compressão axial ao adicionar fibra, ocorre devido ao aumento do índice de vazios nas amostras, o que enfraquece a estrutura do concreto. Portanto, os resultados da pesquisa indicam que a adição de fibra de polipropileno no concreto permeável pode resultar em uma queda na resistência à compressão axial devido ao aumento do índice de vazios. Isso é importante considerar ao utilizar esse tipo específico de fibra em concretos permeáveis ou em aplicações onde a resistência à compressão seja uma propriedade essencial.

4.4 Tração por Compressão Diametral

A Figura 25 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral da mistura de referência do concreto permeável.

Figura 25 - Tração por Compressão Diametral – Referência

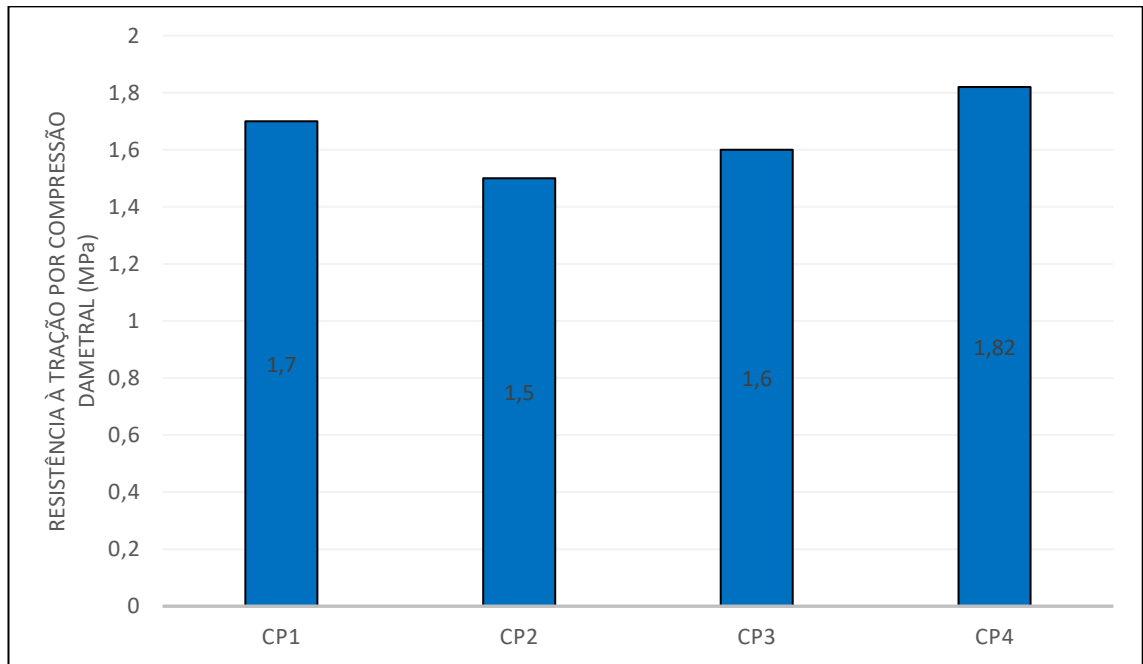


Fonte: Próprio autor.

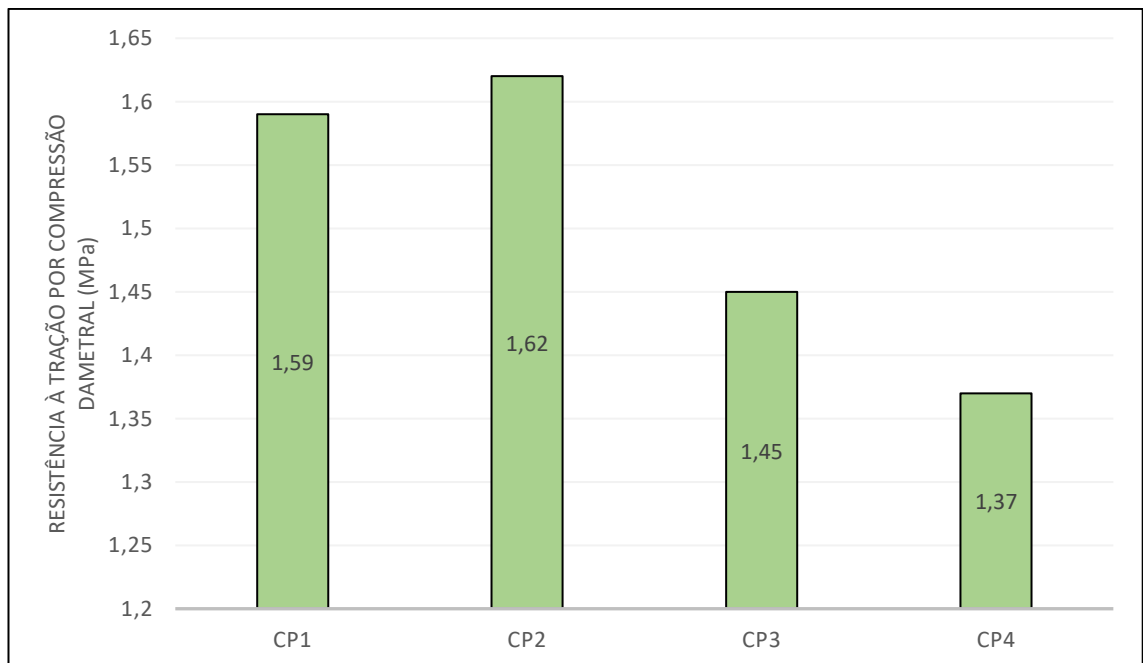
Na mistura de referência, o valor médio de resistência à tração na compressão diametral foi de 2 MPa, com desvio padrão de 0,61 MPa.

Putman *et al.*, (2011), afirmam que a resistência à compressão axial, diametral e à flexão do concreto permeável é significativamente diferente do concreto comum. Isso se deve ao fato de que o concreto permeável possui menor resistência devido à carência de materiais finos e à presença de uma maior quantidade de poros em sua estrutura.

As Figuras 26 e 27 apresentam os resultados de resistência à compressão diametral para a adição de 1 kg/m³ e 2 kg/m³ de fibra de polipropileno.

Figura 26 - Tração por Compressão Diametral – 1Kg/m³

Fonte: Próprio autor.

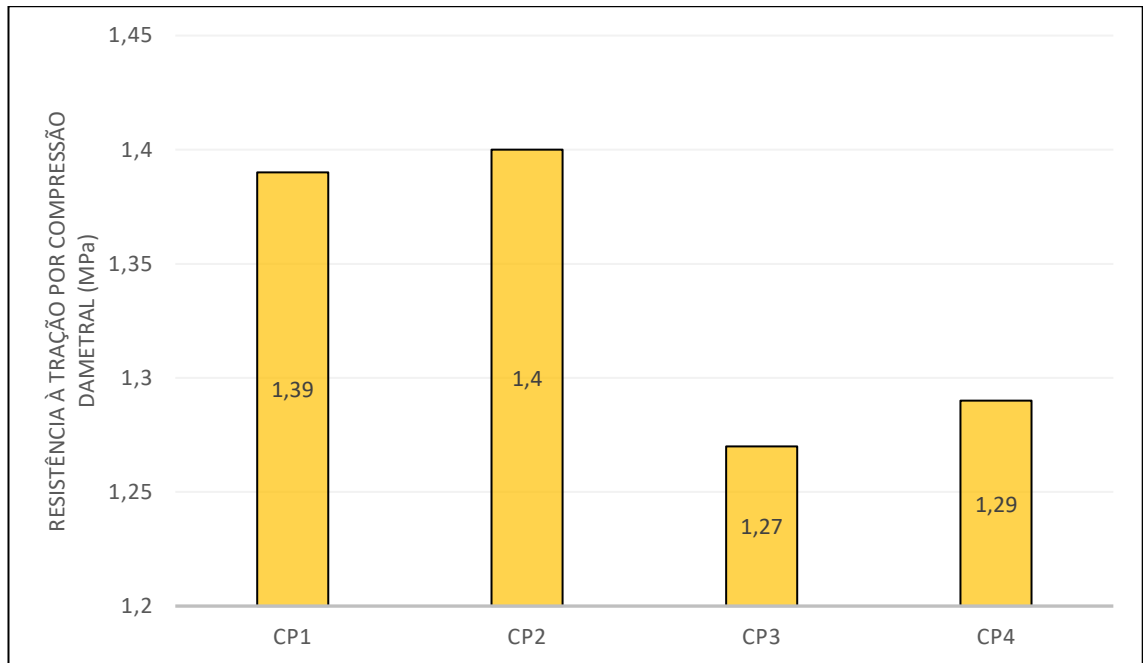
Figura 27 - Tração por Compressão Diametral – 2Kg/m³

Fonte: Próprio autor.

Na mistura com adição de 1 kg/m³ de fibra de polipropileno, o valor médio de resistência à tração na compressão diametral foi de 1,66 MPa, enquanto na mistura

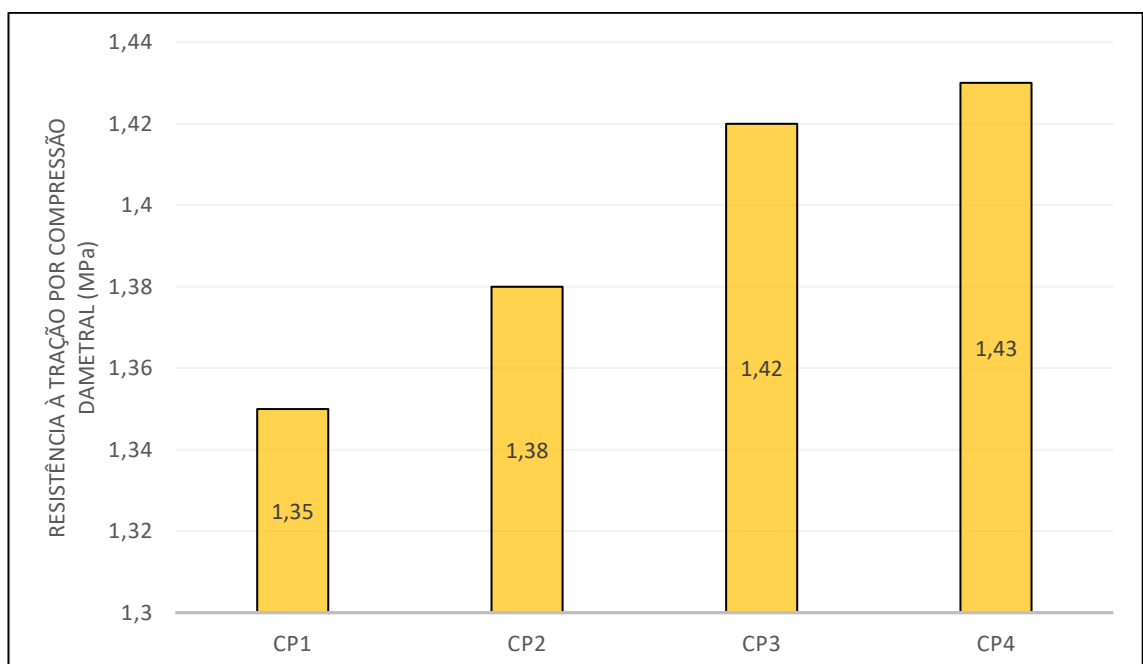
com adição de 2 kg/m³ a média foi de 1,5 MPa. As Figuras 28 e 29 apresentam os resultados de resistência à compressão diametral para a adição de 3 kg/m³ e 4 kg/m³ de fibra de polipropileno.

Figura 28 - Tração por Compressão Diametral – 2Kg/m³



Fonte: Próprio autor.

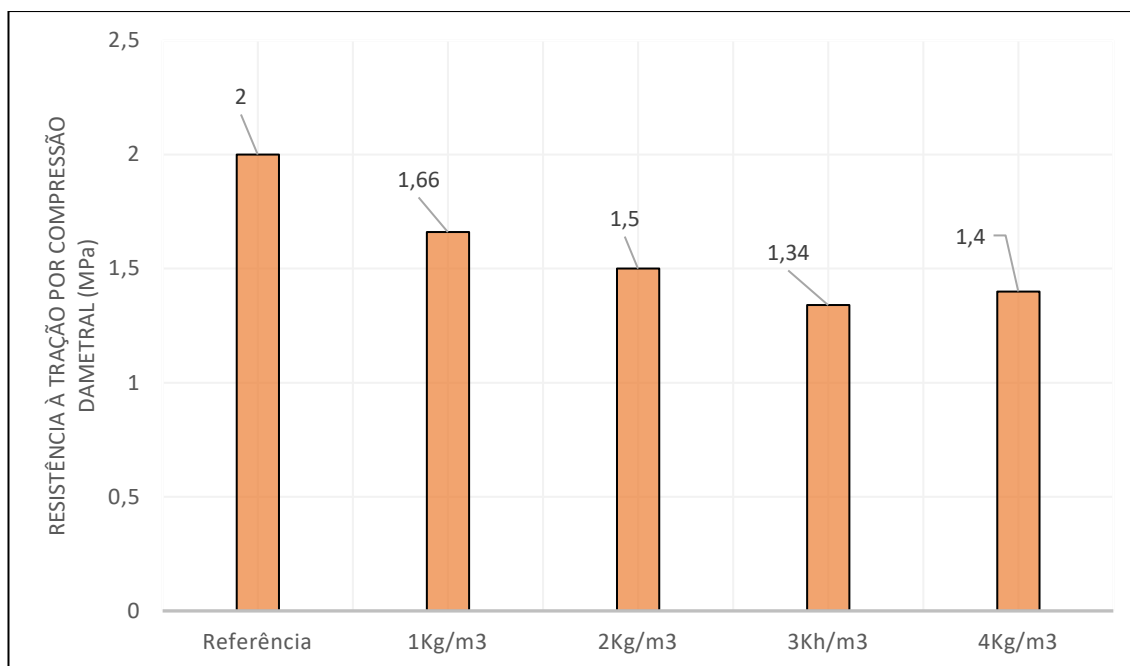
Figura 29 - Tração por Compressão Diametral – 2Kg/m³



Fonte: Próprio autor.

Na mistura com adição de 3 kg/m³ de fibra de polipropileno, o valor médio de resistência à tração na compressão diametral foi de 1,34 MPa, enquanto na mistura com adição de 4 kg/m³ a média foi de 1,4 MPa. A Figura 30 apresenta a comparação entre as cinco misturas em estudo.

Figura 30 - Tração por Compressão Diametral



Fonte: Próprio autor.

Conforme se observa na Figura 30, a resistência à tração por compressão diametral a adição de fibra de polipropileno apresentou queda de valores em relação à mistura de referência e com aumento de fibras.

A mistura com adição de 1 kg/m³ de fibra apresentou uma redução de 17% na resistência à tração em relação à mistura de referência, enquanto a mistura com adição de 2 kg/m³ reduziu em 25%. As misturas com adição de 3 kg/m³ e 4 kg/m³ de fibra de polipropileno mostraram reduções de 33% e 31,5%, respectivamente. Através da Equação 6, o valor encontrado foi de 2,04 MPa, estando muito próximo do valor obtido, para a mistura de referência, através da análise em laboratório, como mostra a tabela 11.

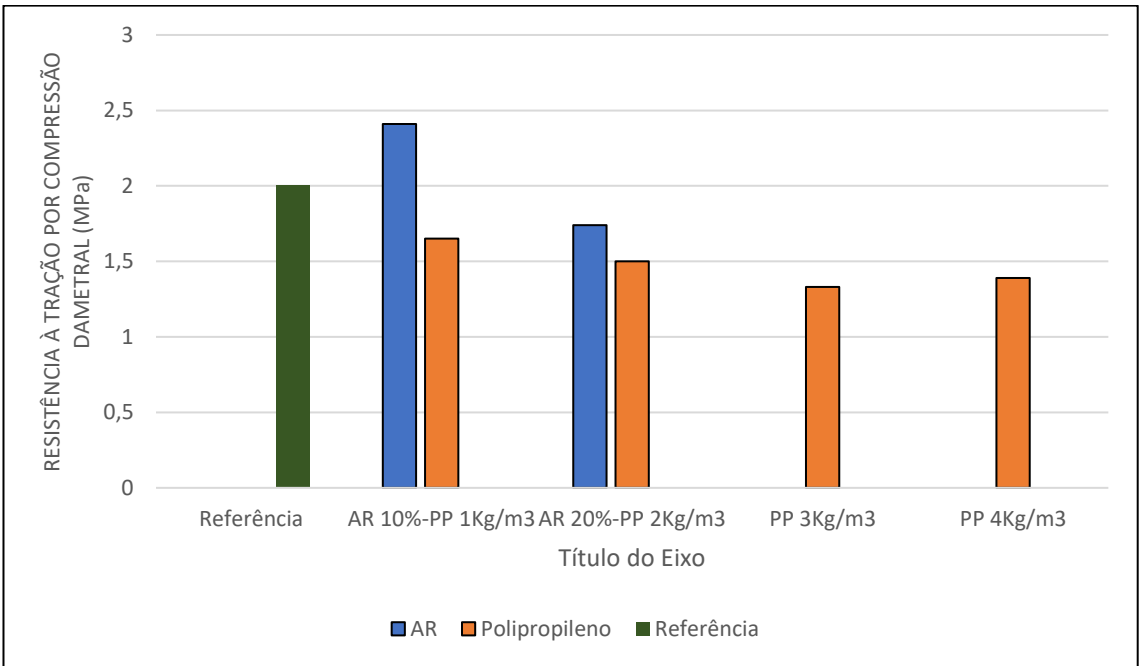
Tabela 11 - Compressão Diametral (Trabalho x Gaedicke (2016))

	Referência	1Kg/m ³	2Kg/m ³	3Kg/m ³	4Kg/m ³
Ensaio	2 Mpa	1,66 MPa	1,5 MPa	1,34 MPa	1,4 MPa
Equação de Gaedicke	2,04 Mpa	1,85 MPa	1,59 MPa	1,31 MPa	1,36 MPa

Fonte: Próprio autor.

Santana (2024), analisou o mesmo traço de concreto permeável utilizando fibra de vidro (AR). A Figura 31 traz um comparativo da resistência a tração por compressão diametral entre a adição de fibra de polipropileno e a adição de fibra de vido, no estudo foi utilizado uma adição de 10% e 20% de fibra de vidro em relação a massa da mistura.

Figura 31 - Diametral (AR x Polipropileno)



Fonte: Próprio autor.

Observa-se uma discrepância nos valores de resistência à tração por compressão diametral, onde a mistura com adição de 10% de fibra de vidro (AR) obteve o valor de 2,41 MPa, apresentando maior resistência em relação à mistura de referência, enquanto que com a adição de fibra de polipropileno houve redução na

resistência. A maior resistência obtida com a fibra de vidro (AR) foi superior em 31,5% em comparação ao maior valor obtido com a adição de fibra de polipropileno.

Wang *et al.*, (2024), analisaram um modelo de projeto para prever a fissuração no concreto convencional reforçado com fibras de polipropileno. Os testes revelaram que o aumento da fração volumétrica das fibras de polipropileno resulta em uma redução significativa no desempenho mecânico da zona de transição interfacial.

Foi realizada a análise de variância (ANOVA), a fim de determinar se há diferenças estatisticamente significativas entre as amostras. A Tabela 12 apresenta os resultados dessa análise.

Tabela 12 - ANOVA - Diametral

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFERÊNCIA	4	8	2	0,125
1Kg/m3	4	6,62	1,655	0,01877
2Kg/m3	4	6,03	1,5075	0,01389
3Kg/m3	4	5,35	1,3375	0,00449
4Kg/m3	4	5,58	1,395	0,00137

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,12123	4	0,28031	8,57122	0,00083	3,05557
Dentro dos grupos	0,49055	15	0,0327			
Total	1,61178	19				

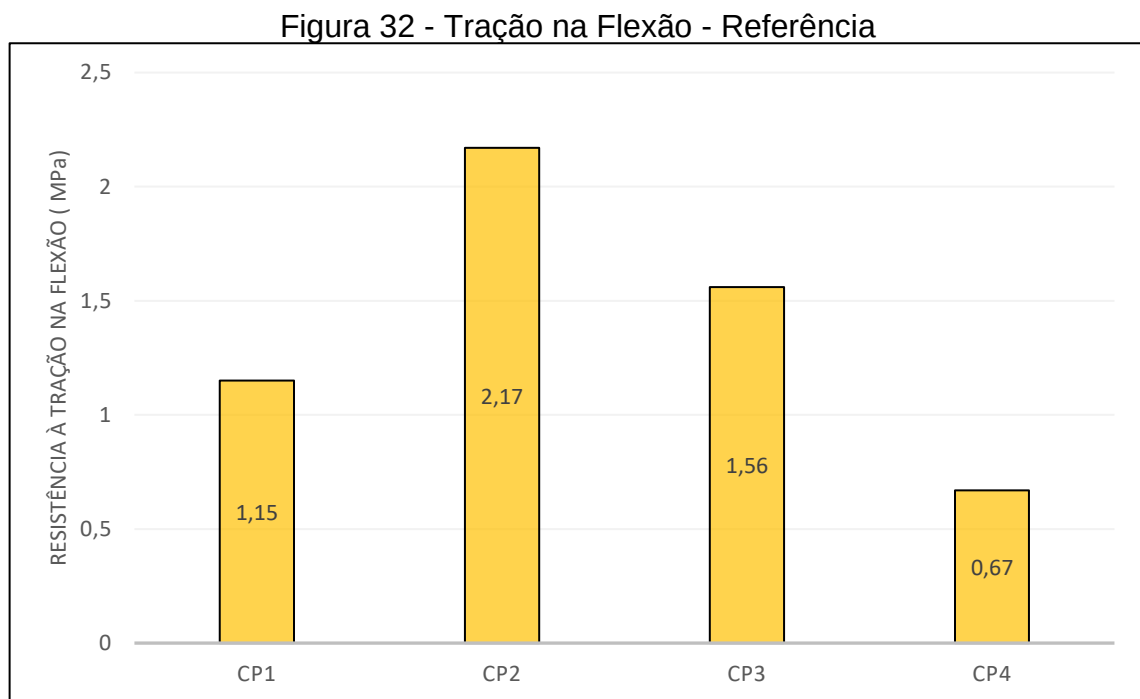
Fonte: Próprio autor.

Observa-se na Tabela 11 que o valor de F (8,57) é maior do que o valor de F-crítico (3,05) e o valor-P é menor do que 0,05. Portanto, é possível assumir que a

hipótese nula é invalidada, indicando que há diferença estatisticamente significativa entre as misturas.

4.5 Tração na Flexão

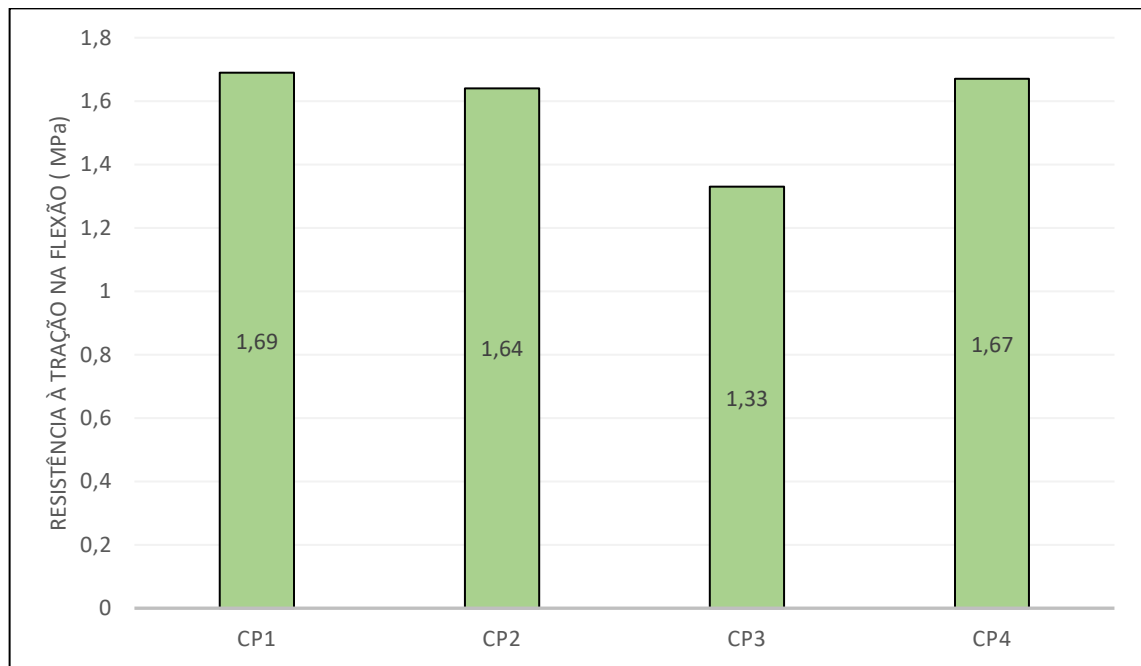
O ensaio de tração na flexão foi realizado a 4 pontos. O valor médio de resistência na mistura de referência foi de 1,38 MPa, com desvio padrão de 0,48, como apresentado na Figura 32.



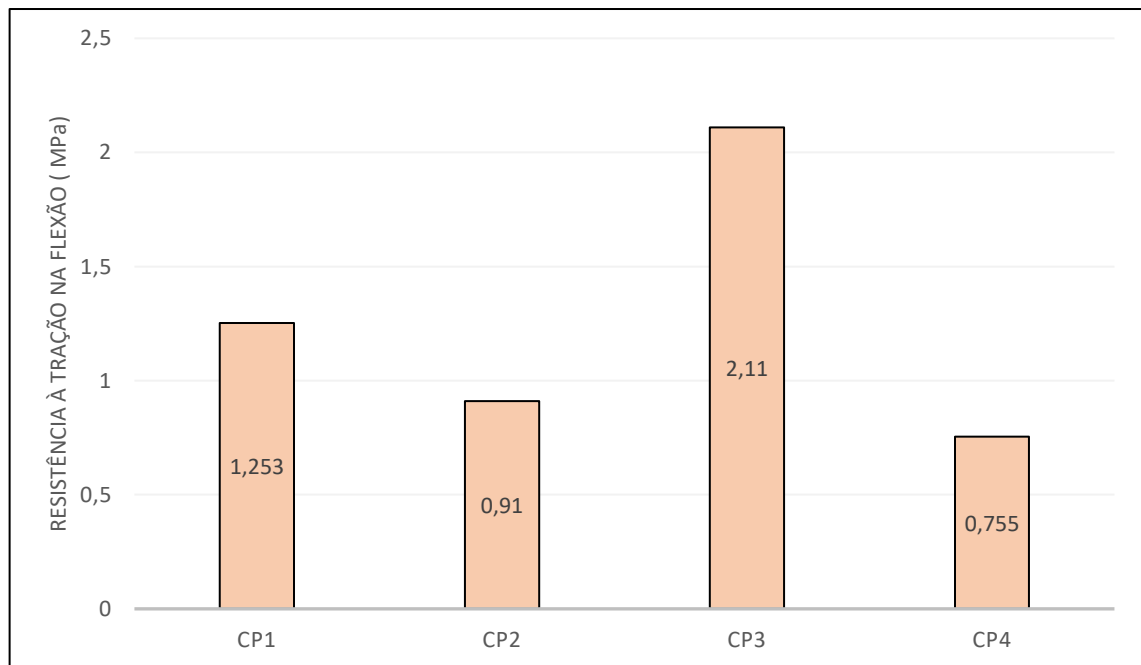
Fonte: Próprio autor.

Buscou na bibliografia autores que realizaram a comparação entre os ensaios de resistência para que fosse possível estimar as resistências a tração na flexão por meio da resistência a compressão axial.

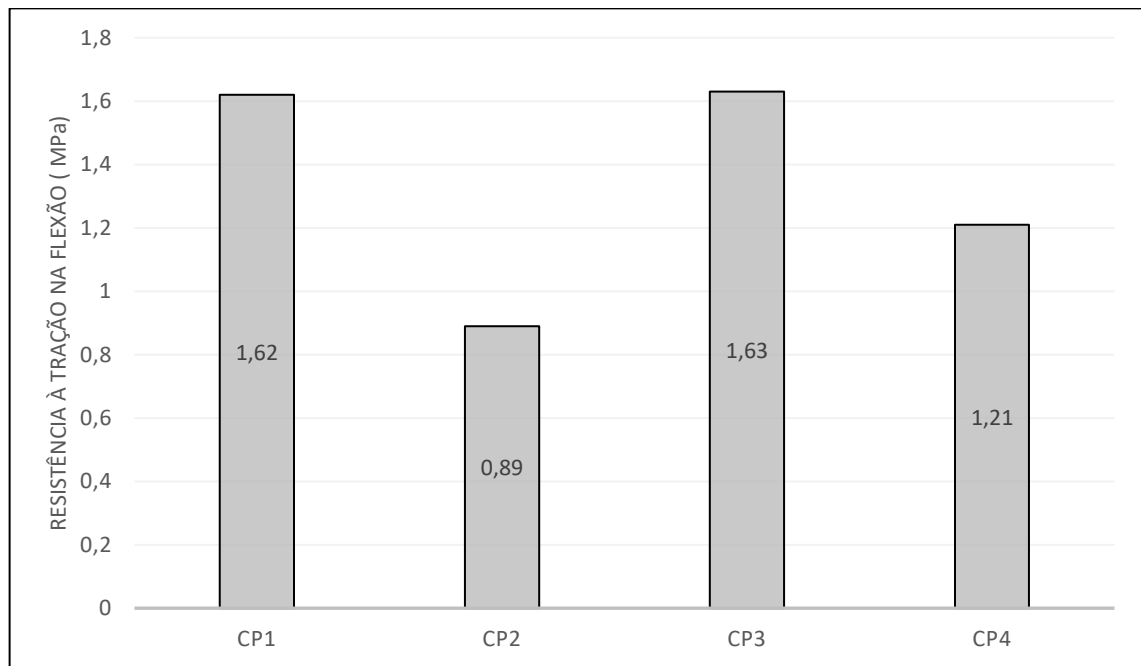
Os valores médios obtidos nas misturas com adição de 1 Kg/m³, 2 Kg/m³, 3 Kg/m³ e 4 Kg/m³ de fibra foram respectivamente 1,5MPa, 1,34MPa, 1,26MPa e 1,17MPa, como apresentados nas Figuras 33, 34, 35 e 36.

Figura 33 - Tração na Flexão – 1Kg/m³

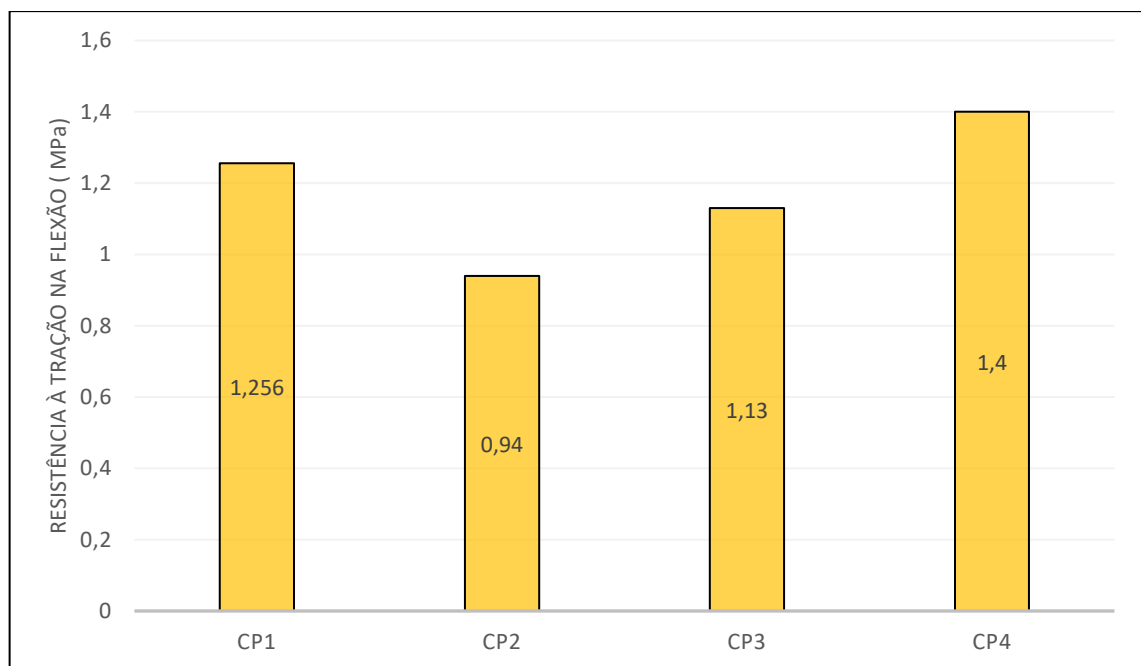
Fonte: Próprio autor.

Figura 34 - Tração na Flexão – 2Kg/m³

Fonte: Próprio autor.

Figura 35 - Tração na Flexão – 3Kg/m³

Fonte: Próprio autor.

Figura 36 - Tração na Flexão – 4Kg/m³

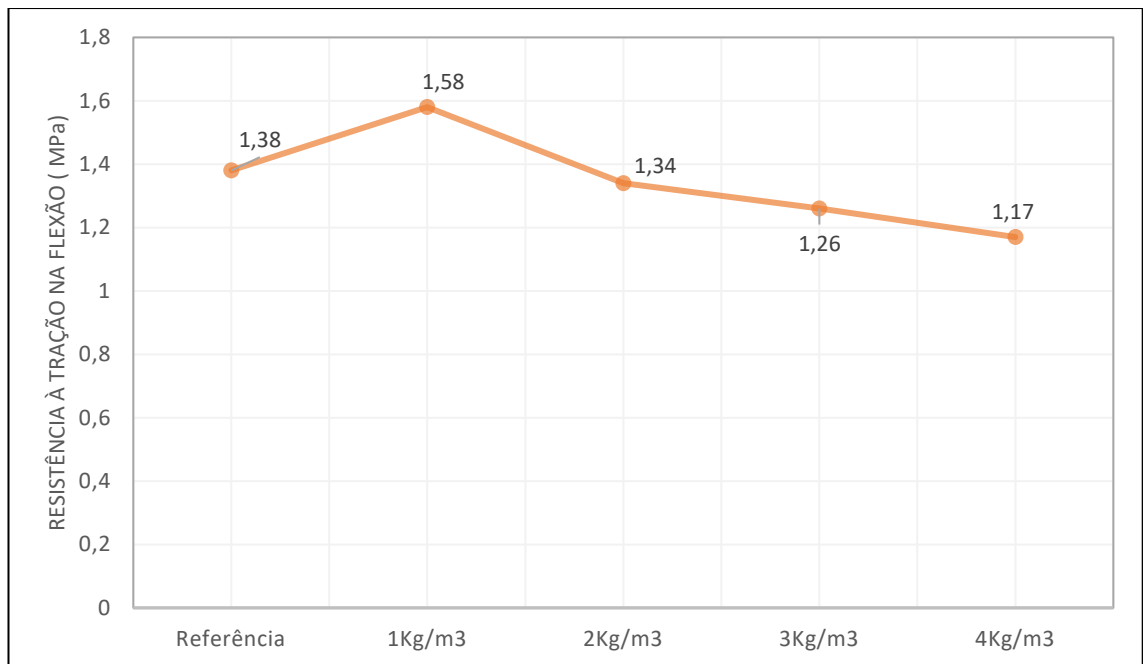
Fonte: Próprio autor.

Segundo Zhang, *et. al.*, (2024), a presença de fibra pode retardar tanto o início quanto a propagação das trincas de tensão na extensão de uma trinca existente. Conforme a quantidade de fibra aumenta, o comprimento das fissuras simétricas na extremidade da trinca diminui gradualmente. Quando a quantidade de fibra excede 2

kg/m³, as fissuras laterais na extremidade da trinca existente desaparecem, evitando falhas por tração, diminuindo a fragilidade e melhorando a ductilidade. A Figura 37 traz uma comparação entre a mistura de referência e as misturas com adição de fibra.

3.5

Figura 37 - Tração na Flexão



Fonte: Próprio autor.

Ao adicionar 1 Kg/m³ a resistência aumentou 8,7% enquanto que ao se adicionar 2 Kg/m³ houve uma redução da resistência a flexão é de 2,9%. A maior redução da resistência se deu com adição de 4 Kg/m³ de fibra, tendo uma queda de 15,2% e com a adição de 3 Kg/m³ a redução foi de 8,9%.

Também foi possível estimar o valor da resistência à flexão pela equação de Gaedicke (2016). O autor define na Equação 7 por meio da qual é possível associar a resistência a compressão axial com a resistência a tração na flexão. Através da Equação, o valor encontrado é de 3,62MPa, valor bem acima do valor médio obtido através da análise em laboratório, como mostra a Tabela 13.

Tabela 13 - Tração na Flexão (Trabalho x Chhorn *et al.* (2018))

	Referência	1Kg/m ³	2Kg/m ³	3Kg/m ³	4Kg/m ³
Ensaio	1,38 MPa	1,58 MPa	1,34 MPa	1,26 MPa	1,17 MPa
Equação de Chhorn <i>et al.</i> (2018)	3,62 MPa	3,39 MPa	3,05 MPa	2,67 MPa	2,73 MPa

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 14 apresenta a comparação dos resultados deste estudo com alguns estudos encontrados na literatura para concreto permeável.

Tabela 14 - Comparação dos resultados de resistência à tração na flexão com a literatura.

Resistência à Tração na Flexão Presente Trabalho (Mpa)	Resistência à Tração na Flexão Batezine (2013) (Mpa)	Resistência à Tração na Flexão Brasileiro (2024) (Mpa)	Resistência à Tração na Flexão Lin e Yu (2022) (Mpa)	Resistência à Tração na Flexão Santana (2024) (Mpa)	Resistência à Tração na Flexão Fei (2024) (Mpa)
1,38	2,16	2,46	2,61	2,41	8,86
1,5	2,03	2,33	11,11	1,74	
1,34	2,22	1,78	4,36		
1,26	1,38	2,12			
1,17	1,5				
	1,34				
	1,26				
	1,17				

Fonte: Próprio autor.

Na literatura, os resultados geralmente são maiores do que os do presente trabalho, porém apresentam índices de vazios menores. Brasileiro *et al.*, (2024), trabalharam com índices de vazios na faixa de 12 a 16%; Fei *et al.*, (2024) 11%; e Batezine (2022), de 24 a 25%.

Observa-se que a resistência diminui com o aumento do índice de vazios, enquanto a permeabilidade aumenta. Santana *et al.*, (2024), trabalharam com índices de vazios mais próximos aos do presente estudo e também encontraram valores de resistência mais altos. No entanto, é importante lembrar que os valores obtidos por Santana foram para o ensaio de flexão a três pontos, o que resulta em valores de resistência mais elevados.

Foi realizado a análise de Variância (ANOVA) que constitui na técnica estatística utilizada para comparar as médias de três ou mais grupos independentes para determinar se há diferenças estatisticamente significativas entre eles, como mostra a Tabela 15.

Observa-se que o valor de F (0,03209) é menor do que o valor de F-crítico (3,05557), e o valor-P (valor de prova) é superior a 0,05 (nível de significância). Portanto, é possível assumir que a hipótese nula é válida, mostrando que não há diferença estatisticamente entre as misturas.

Tabela 15 - ANOVA - Tração na Flexão

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFERÊNCIA	4	5,55	1,3875	0,40443
1Kg/m ³	4	5,55	1,3875	0,40443
2Kg/m ³	4	5,028	1,257	0,36668
3Kg/m ³	4	5,35	1,3375	0,12729
4Kg/m ³	4	4,726	1,1815	0,03809

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,12836	4	0,03209	0,11966	0,97336	3,05557
Dentro dos grupos	4,02273	15	0,26818			
Total	4,15109	19				

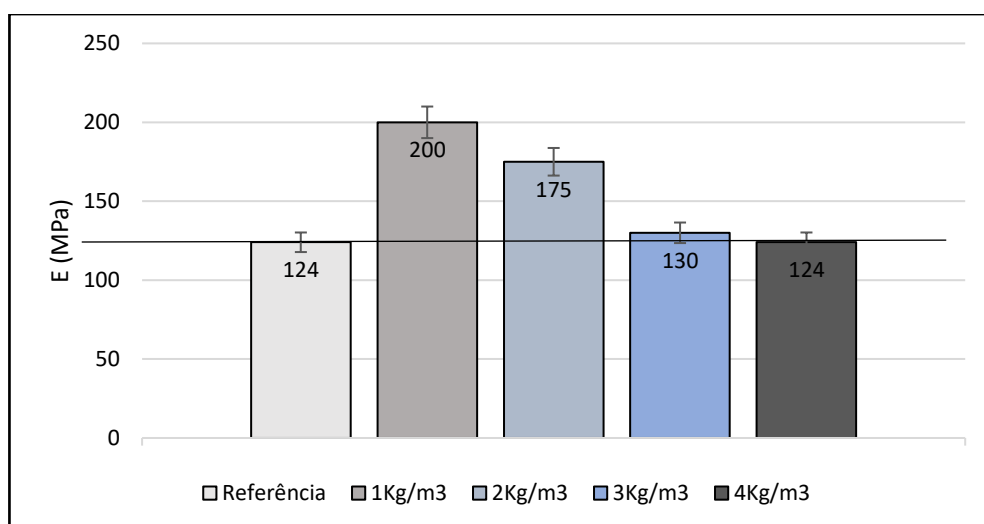
Fonte: Próprio autor.

4.6 Módulo de Elasticidade na Flexão (Módulo de Young)

O módulo de elasticidade mede a resistência de um elemento à deformação elástica quando uma força é aplicada, sendo um parâmetro crucial em projetos estruturais de concreto.

Os valores para o módulo de elasticidade foram obtidos através do ensaio de tração na flexão a quatro pontos (Equação 4), sendo a deformação medida com o uso do LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). A Figura 38 apresenta os resultados para a mistura de referência e as misturas com adição de fibras. Os resultados indicam que a fibra de Polipropileno segurou a flecha no centro do corpo de prova, o que influenciou os valores de módulo de elasticidade, visto que o mesmo é inversamente proporcional à medida da flecha no centro do corpo de prova.

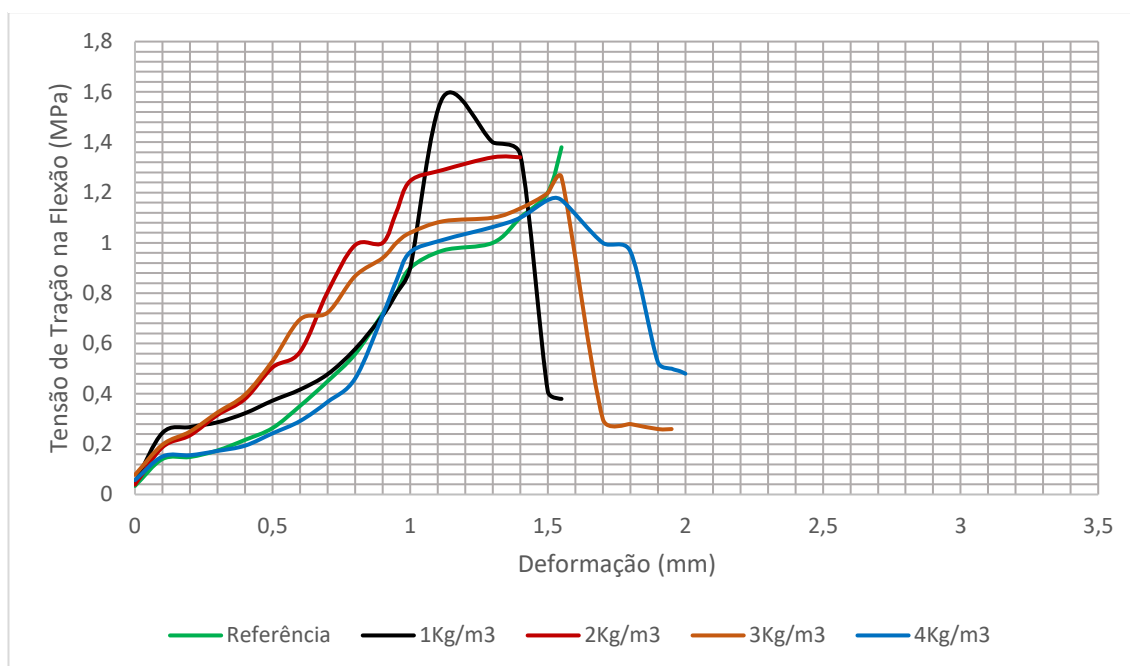
Figura 38 - Módulo de Elasticidade (E)



Fonte: Próprio autor.

Analisando a curva média de tensão/deformação, conforme mostrado na Figura 39, é possível observar uma redução na deformação de pico das misturas em relação à mistura de referência. A mistura de referência apresentou uma deformação média de 1,54 mm, enquanto que a mistura com adição de 1 kg/m³ de fibra de polipropileno registrou uma deformação média na carga de pico, pelo LVDT, de 1,12 mm, o que representa uma redução de 27,27%. Entretanto, o material com fibra continuou a se deformar no pós-pico, enquanto o material sem fibra rompeu no pico.

Figura 39 - Curva Tensão/Deformação



Fonte: Próprio autor.

Observa-se na Figura uma queda na deformação para as misturas com adição de 1 kg/m³ e 2 kg/m³, enquanto que com adição de 3 kg/m³ e 4 kg/m³, a deformação ficou próxima na mistura de referência, tendo uma redução na tensão.

A Tabela 16 traz os resultados de resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade da mistura de referência e das misturas com adição de fibra. Observa-se uma correlação entre a deformação (flecha máxima obtida no ponto de ruptura) e o valor da resistência à tração na flexão.

Para a mistura com adição de 1 kg/m³ de fibra de polipropileno, foi obtida uma resistência à tração na flexão de 1,58 MPa, com uma flecha máxima de 1,12 mm. Comparativamente, a mistura de referência apresentou 1,38 MPa de resistência à tração na flexão e uma flecha máxima de 1,54 mm. Já para as misturas com adição de 2 kg/m³, 3 kg/m³ e 4 kg/m³, os valores foram respectivamente 1,34 MPa / 1,14 mm, 1,26 MPa / 1,40 mm e 1,17 MPa / 1,53 mm.

Esses dados mostram que, apesar de ocorrer redução na resistência à tração na flexão com a adição de fibra, a flecha máxima medida é um parâmetro indispensável a ser considerado na avaliação do desempenho das misturas e impacta o módulo de elasticidade, conforme se pode observar na Equação 4.

Tabela 16 - Resistência à Tração na Flexão, Flecha e Módulo de Elasticidade

Misturas	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Flecha Máx. (mm)	Diferença Flecha (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Diferença E (%)
Referência	1,38	1,54	-	124	-
1Kg/m ³	1,5	1,12	- 27,27	200	+ 60,9
2Kg/m ³	1,34	1,14	- 25,97	175	+ 44,95
3Kg/m ³	1,26	1,4	- 9,1	130	+ 6,1
4Kg/m ³	1,17	1,53	- 0,65	123	0

Fonte: Próprio autor.

Batezine (2013), analisou três amostras de concreto permeável sem adições, diferenciando os traços para condições de tráfego, por meio de ensaios de tração na flexão à quatro pontos utilizando LVDT para medir a flecha em vigotas com dimensões de 100x100x400mm. A Figura 40 traz os resultados obtidos pelo autor, com valores de módulo de elasticidade de 15,98 GPa, 15,52 GPa e 16,49 GPa para as amostras analisadas.

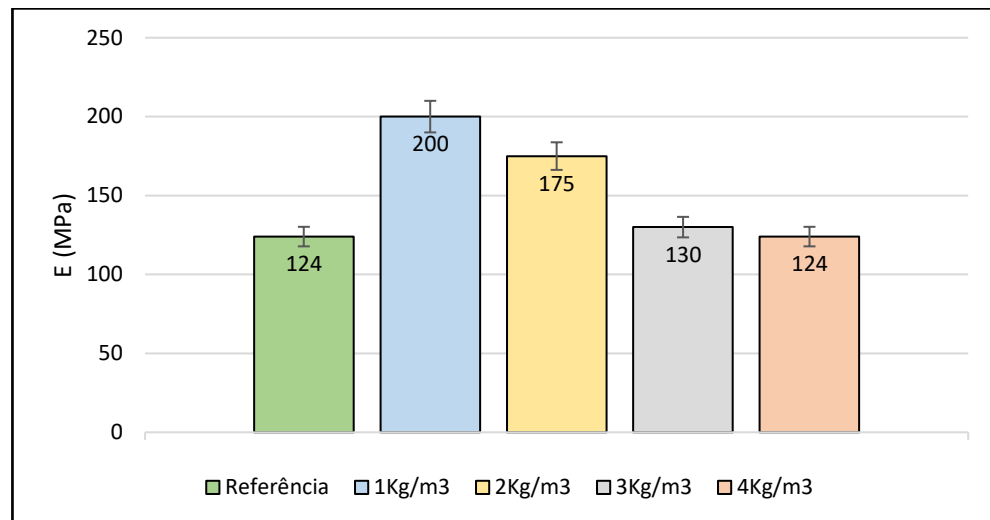
Figura 40 - Resistência à Tração na Flexão e Módulo de Elasticidade (Batezine, 2013).

Resistência à Tração na Flexão (MPa)			Módulo de Elasticidade Estático (GPa)		
M1	M2	M3	M1	M2	M3
9	9	9	5	5	8
2,16	2,03	2,22	15,98	15,52	16,49
0,27	0,20	0,27	3,98	1,66	2,55
12,44	9,71	12,03	24,91	10,73	15,48

Fonte: Batezine, 2013.

Utilizando a equação 5, podemos obter os valores do módulo de elasticidade com relação à resistência a compressão e à massa específica do concreto. Os resultados obtidos estão postos na Figura 41.

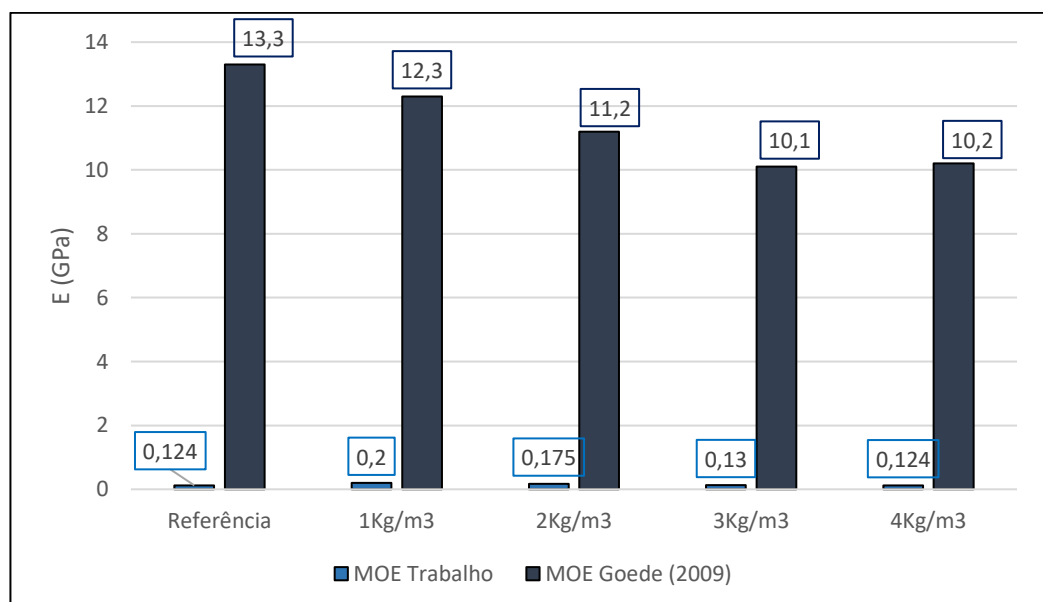
Figura 41 - Módulo de Elasticidade - Equação de Goede



Fonte: Próprio autor.

No presente estudo, os valores obtidos por meio da equação de Goede (2009), foram divergentes com relação aos obtidos experimentalmente. A Figura 42 traz a comparação entre os valores de módulo de elasticidade obtidos por tração na flexão com os obtidos pelo método linear.

Figura 42 - (E - Experimental x Equação de Goede (2009)).



Fonte: Próprio autor.

Observa-se uma discrepância entre os valores de módulo de elasticidade obtidos por tração na flexão em relação aos obtidos pela equação de Goede. Essa diferença de valores pode ocorrer pois a equação de Goede tem como variável principal o valor de resistência à compressão axial das misturas, enquanto que os outros valores foram obtidos por ensaio de tração na flexão utilizando LVDT para medir a deformação no centro da vigota. A Tabela 17 traz a comparação entre os resultados.

Tabela 17 - Comparação E (Tração na flexão – Equação de Goede)

Misturas	Módulo de Elasticidade Trabalho (MPa)	Módulo de Elasticidade Goede (2009) (GPa)
Referência	124	12,7
1Kg/m ³	200	12,3
2Kg/m ³	175	12,2
3Kg/m ³	130	10,1
4Kg/m ³	123	10,2

Fonte: Próprio autor.

Na análise das curvas de tensão-deformação, é possível observar o comportamento das misturas em relação à deformação após atingirem o valor máximo de resistência. O material com fibra continua a deformar mesmo após atingir o pico de resistência, enquanto o material sem fibra se rompe no pico da carga (Figura 39).

A Figura 43 ilustra os dois extremos de comportamento: o de ruptura mas abrupta e o de ruptura mais suave, após ensaio de tração na flexão.

A Figura (a) corresponde à mistura de referência, onde análises da imagem e do gráfico tensão/deformação da Figura 39 indicam uma ruptura abrupta.

Na Figura (b), com adição de 4 kg/m³ de fibra, observa-se uma deformação pós-pico mais suave e extensa em comparação com a mistura de referência. Neste caso, o corpo de prova não se rompe após atingir a carga máxima, com fissuras sendo quase imperceptíveis

Figura 43 - Análise Visual Após Carga Máxima



Fonte: Próprio autor.

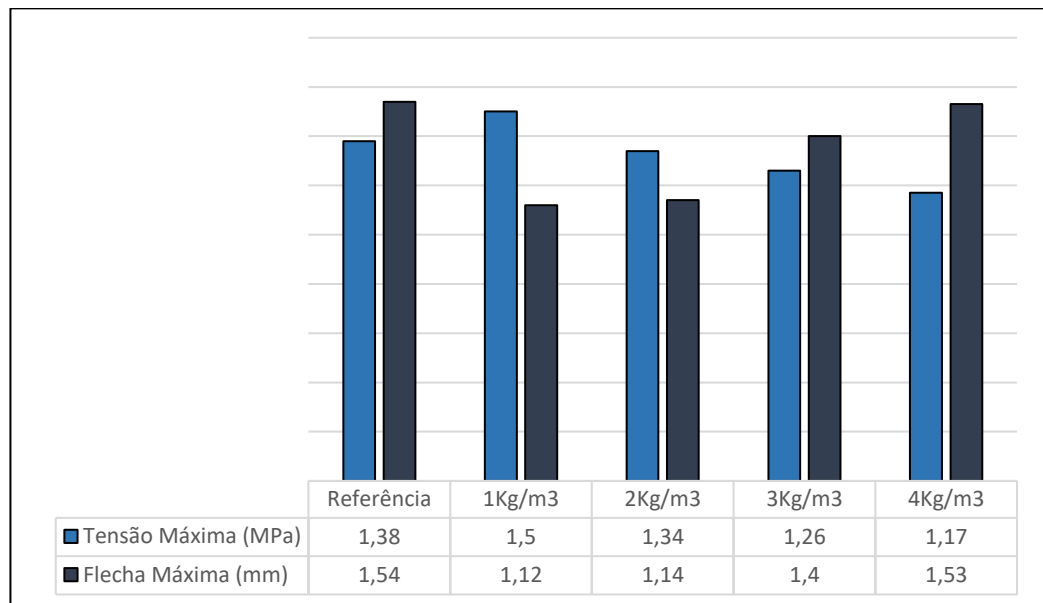
A tabela 18 e a Figura 45 trazem a comparação entre a resistência à tração na flexão e a flecha obtida para cada mistura.

Tabela 18 - Resistência à Tração na Flexão e Flecha

Misturas	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Diferença Tração na Flexão (%)	Flecha Máx. (mm)	Diferença Flecha (%)
Referência	1,38	-	1,54	-
1Kg/m ³	1,5	+8,9	1,12	- 27,27
2Kg/m ³	1,34	- 2,9	1,14	- 25,97
3Kg/m ³	1,26	- 8,9	1,4	- 9,1
4Kg/m ³	1,17	- 15,2	1,53	- 0,65

Fonte: Próprio autor.

Figura 44 - Tensão máxima x Flecha máxima



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 19 apresenta a comparação entre a tensão máxima na ruptura, a flecha máxima obtida nos ensaios e o módulo de elasticidade.

Tabela 19 – Comparativo: Tensão - E - Flecha

Misturas	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Flecha Máx. (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)
Referência	1,38	1,54	124
1Kg/m ³	1,5	1,12	200
2Kg/m ³	1,34	1,14	175
3Kg/m ³	1,26	1,4	130
4Kg/m ³	1,17	1,53	123

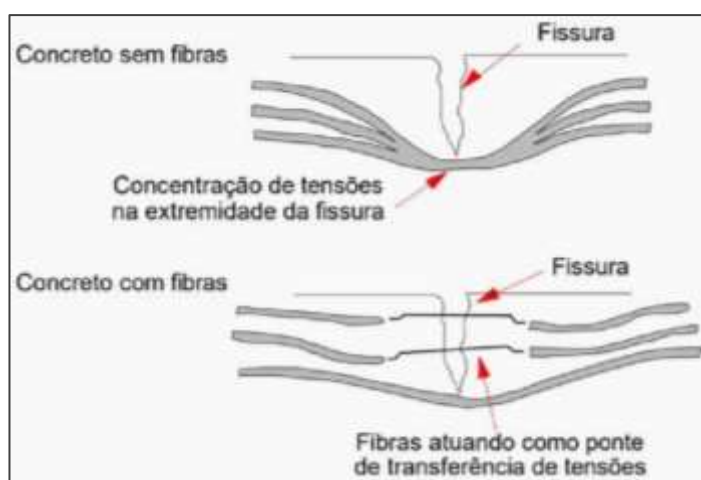
Fonte: Próprio autor.

Segundo Plizzari e Mindess (2019), a introdução de fibras no concreto visa principalmente melhorar a estabilização da propagação de trincas e aumentar a capacidade de deformação do material. As fibras contribuem para elevar a capacidade

de deformação, aumentar a rigidez e a resistência ao impacto, além de controlar o processo de fissuração do concreto.

Isto ocorre porque as fibras restringem a abertura da trinca, dificultando sua propagação, conforme ilustrado na Figura 7, o que reduz o valor da flecha no centro do corpo de prova. No entanto, após uma certa quantidade de fibra, a resistência começa a diminuir o suficiente para que a fibra não consiga mais conter a propagação da trinca e, conseqüentemente, a deformação da flecha.

Figura 45 - Atuação de fibras no concreto



Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 43, observa-se que, no caso do concreto permeável, a fibra de polipropileno reduziu a deformação, para a carga de pico, mas depois continuou deformando, enquanto que a mistura de referência teve ruptura abrupta sem ter deformação após atingir a carga de pico.

Com a adição de 1 kg/m^3 , houve um aumento na resistência à tração na flexão, mas uma queda na flecha máxima do material foi observada. Aumentando a massa de fibra no concreto permeável, observou-se uma queda gradual na resistência à tração na flexão à medida que o teor de fibra aumentava, enquanto a flecha máxima aumentava gradualmente. Isso impactou nos valores do módulo de elasticidade.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa foi conduzida com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas do concreto permeável, incluindo resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade. Também foi avaliado a permeabilidade, índice de vazios e a massa específica. Foram preparados cinco lotes de misturas, sendo a mistura de referência e misturas com adições de 1Kg/m^3 , 2Kg/m^3 , 3Kg/m^3 e 4Kg/m^3 de fibra de polipropileno.

Os resultados obtidos permitem inferir as seguintes conclusões:

- a) Massa Específica: Os ensaios de massa específica indicaram que todas as misturas das amostras de concreto permeável endurecido atingiram valores de massa específica aparente seca, dentro do recomendado pela literatura. Porém, notou-se que as massas específicas aparentes das amostras de concreto permeável com adição da fibra de Polipropileno diminuem em relação a mistura de referência e essa queda aumenta com o aumento de fibra. A perda da massa específica aparente ocorre devido a incorporação do ar durante a mistura do concreto permeável com as fibras Polipropileno.
- b) Índice de Vazios e Coeficiente de Permeabilidade: ficou evidente que a fibra influencia no aumento do índice de vazios do concreto permeável e por consequência aumentando a permeabilidade do concreto. Este fenômeno se dá pelo acúmulo de ar na matriz do concreto, especialmente nas interfaces entre a mistura cimentícia e as fibras de polipropileno.
- c) Resistência à Compressão Axial: As adições de fibra de polipropileno influenciaram a resistência à compressão axial do concreto permeável. Observou-se que houve uma queda da resistência à compressão com o acréscimo de fibra que aumentou com o aumento da mesma. A queda da resistência à compressão pode estar diretamente relacionada ao aumento do índice de vazios no concreto permeável com adição da fibra de Polipropileno.
- d) Resistência à Tração por Compressão Diametral: Houve uma redução na resistência à tração por compressão diametral nas misturas com adição de fibra de polipropileno, especialmente com teores mais elevados de

fibra. Este efeito também pode ser atribuído ao aumento do índice de vazios no concreto.

- e) Resistência à Tração na Flexão: A resistência à tração na flexão foi variadamente afetada pela adição de fibra de polipropileno. Verificou-se que a mistura com adição de 1 Kg/m^3 obteve valor do que a mistura de referência. Já a adição de 2 Kg/m^3 apresentou valor muito similar à mistura de referência e as adições de 3 Kg/m^3 e 4 Kg/m^3 mostraram uma redução da resistência à tração na flexão de respectivamente.
- f) Módulo de Elasticidade à Flexão: A inclusão da fibra de Polipropileno no concreto permeável conferiu um aumento do módulo de elasticidade do material. A única mistura que não apresentou aumento no módulo de elasticidade foi a que teve acréscimo de 4 Kg/m^3 de fibra, nessa mistura o valor se manteve igual ao valor da mistura de referência. A fibra influenciou diretamente à deformação do concreto permeável, onde houve redução da flecha máxima na ruptura, principalmente nas misturas de 1 Kg/m^3 e 2 Kg/m^3 , o que influenciou diretamente no aumento do módulo de elasticidade. A redução da flecha com acréscimo de fibra ocorre porque as fibras restringem a abertura da trinca, dificultando sua propagação, o que reduz o valor da flecha no centro do corpo de prova. No entanto, após uma certa quantidade de fibra, a resistência começa a diminuir o suficiente para que a fibra não consiga mais conter a propagação da trinca e, conseqüentemente, a deformação da flecha.
- g) Deformação Pós-Pico: Observou-se na mistura de referência ruptura abrupta caracterizada por uma rápida falha após atingir a carga máxima. O mesmo foi observado quando se elevou a massa de fibra para 2 Kg/m^3 . Com adição de 1, 3 e 4 kg/m^3 de fibra a deformação continuou após atingir a carga máxima.

Considerações Finais:

Em resumo, a pesquisa mostrou que a adição de fibra de polipropileno exerce um impacto nas propriedades mecânicas, hidráulicas e na composição do concreto permeável. Recomenda-se estudos de fadiga e fratura do concreto permeável com

adição da fibra de Polipropileno para obter resultados mais abrangentes sobre o comportamento da fibra no concreto.

Estas conclusões refletem uma síntese dos resultados alcançados através dos ensaios realizados, fornecendo uma visão abrangente das mudanças nas propriedades mecânicas do concreto permeável em resposta à adição de fibras de polipropileno.

REFERÊNCIAS

- ABAEIAN, R.; BEHBAHANI, H. P.; MOSLEM, J. S. Effects of high temperatures on mechanical behavior of high strength concrete reinforced with high performance synthetic macro polypropylene (HPP) fibres. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 165, p. 631-638, mar. 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.064.
- ADAMU, M.; AYENI, K. O.; HARUNA, S. I.; MANSOUR, Y. E. I.; HARUNA, S. Durability performance of pervious concrete containing rice husk ash and calcium carbide: A response surface methodology approach. **Case Studies in Construction Materials**, Amsterdam, v. 14, e00547, 2021.
- ALAM, A.; HASELBACH, L.; COFER, W. Validation of the Performance of Pervious Concrete in a Field Application with Finite Element Analysis (FEA). **Journal of ASTM International**, West Conshohocken, Vol. 9, n. 4, 2012, DOI: 10.1520/JAI104553.
- ARANDEI, M.; DARWISH, I. F.; GHAVAMI, K. Experimental study on variation of mechanical properties of a cantilever beam of bamboo. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 101, p. 784-790, 2015.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-10**: Report on Pervious Concrete. Farmington Hills: ACI, 2010. 40 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1116/C1116M - 10A**: Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete. West Conshohocken: ASTM, 2017. 7 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C127-15/C127-15**: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. West Conshohocken: ASTM, 2016. 5 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C293/C293-16**: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading). West Conshohocken: ASTM, 2016. 4p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1666/C1666M - 08**: Standard Specification for Alkali Resistant (AR) Glass Fiber for GFRP and Fiber-Reinforced Concrete and Cement. West Conshohocken: ASTM, 2015. 4 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1701/1701M - 17a**: Standard Test Method for Infiltration Rate of In-Place Pervious Concrete. West Conshohocken: ASTM, 2020. 3p.
- AMORIM, M. C. C. T. **Impactos ambientais das transformações urbanas**: estudo de caso em cidades brasileiras. Rio de Janeiro: Editora Ambiental, 2017.
- AMORIM, M. C. C. T. **Transformações urbanas e impactos ambientais em cidades brasileiras**: uma análise integrativa. São Paulo: Editora Acadêmica, 2019.

ARUNACHALAM, A.; JAYAKUMAR, K. Review on the performance of fibre and industrial slag in concrete. **International Journal of Concrete Technology**, Amsterdam, v. 1, n. 1, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7222**: Argamassa e Concreto: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 3 p.

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

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7680**: Concreto: Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência a compressão axial. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 24p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9833**: Concreto fresco: Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12142**: Concreto: Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland: Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 22p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13956**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 6 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Paredes de concreto moldadas no local para a construção de edificações: Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. 2012. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2012.tde-19072013-155819>. Acesso em: 10 nov. 2022.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. 2. ed. New York: Taylor e Francis, 2007. Modern Concrete Technology Series.

BIGOTTO, S. A. M. **Estudo de traços de concreto permeável com adição de areia e sílica**. 2021. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Unesp, Ilha Solteira, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/a229acbc-151f-420a-ad08-7d777b48e144/content>. Acesso em: 27 abr. 2023.

BRASILEIRO, K. P. T. V.; NAHIME, B. De O.; LIMA, E. C.; ALVES, M. M.; CHANDRAPPA, W. P.; SANTOS, I. S. Dos; BEZERRA FILHO, C. P.; REIS, I. C. Dos. Influence of recycled aggregates and silica fume on the performance of permeable concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 82, abr. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223025305>. Acesso em: 5 jul. 2024.

BILAL, M.; RASHEED, T.; MEHMOOD, S.; TANG, H.; FERREIRA, L. F. R.; BHARAGAVA, R. N.; IQBAL, H. M. N. Mitigation of environmentally-related hazardous pollutants from water matrices using nanostructured materials – A review. **Chemosphere**, Oxford, v. 253. n. 1-2, ago. 2018.

CHANDRAPPA, A. K. *et al.* Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and prospects: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 111, p. 262-274, 15 mai. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816301131>. Acesso em: 09 jul. 2023

CHINDAPRASIRT, P.; HATANAKA, S.; CHAREERAT, T.; MISHIMA, N.; YUASA, Y. Cement paste characteristics and porous concrete properties. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 22, p. 894-901, 05 mai. 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061806003618>. Acesso em: 07 jul. 2023.

CHHORN, C.; HONG, S. J.; LEE, S. W. Relationship between compressive and tensile strengths of roller-compacted concrete. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, Beijing, v. 5, n. 3, p. 215-223, jun. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtte.2017.09.002>. Acesso em: 01 jul. 2023.

ELANGO, K. S.; GOPI, R.; SARAVANAKUMAR, R.; RAJESHKUMAR, V.; VIVEK, D.; RAMAN, S. Venkat. Properties of pervious concrete: A state of the art review. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, v. 45, p. 2422-2425, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.839>. Acesso em: 11 out. 2023.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **National Menu of Best Management Practices (BMPs) for Stormwater**. Washington, DC: EPA, 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/>. Acesso em: 5 jul. 2024.

FEI, M.; LUO, C.; ZHENG, X.; FU, T.; LING, K.; CHEN, H.; LIU, W.; QIU R. High-performance permeable concrete using low-cost modified vinyl ester as a binder. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 414, 2 fev. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061824000497>. Acesso em: 5 jul. 2024.

FIGUEIREDO, A. D. de. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. Tese (Livre Docência em Materiais e Componentes de Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2012.tde-18052012-112833>. Acesso em: 28 jul. 2023.

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, out. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.031>. Acesso em: 02 jul. 2023.

GANASINI, D. **Concretos de alto desempenho reforçados com microfibras de polipropileno e submetidos a elevadas temperaturas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2019.

GOEDE, W. G. **Pervious concrete: investigation into structural performance and evaluation of the applicability of existing thickness design methods**. 2009. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engineering Civil) - Washington State University, Department of Civil and Environmental Engineering, Washington, DC, 2009.

HOSSEINZADEH, S. R. The effects of urbanization on the natural drainage patterns and the increase of urban floods: Case study Metropolis of Mashhad-Iran. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, Southampton, v. 84, p. 423-432, 2005. Disponível em: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/84/15543>. Acesso em: 14 jan. 2022.

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, 2014, p. 524-529.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Impactos das mudanças climáticas no Brasil**: contribuições à formulação de uma estratégia de adaptação. Brasília: IPEA, 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

JUMARI, A.; SILVA, B.; OLIVEIRA, C. Urban heat island effects: impacts and solutions. **Journal of Urban Climate Studies**, [s. l], v. 15, n. 2, p. 123-136, 2023.

KOIKE, G. P. C.; CUSTÓDIO, I. P.; RÜTHER, R. Desafios e soluções de projeto e construção de uma edificação solar no Brasil. *In*: ANAIS CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR – CBENS, 10., 2024, Natal. **Anais [...]**. São Paulo: ABENS, 2024. <https://doi.org/10.59627/cbens.2024.2529>.

KISTAN, Y.; *et al.* Effect of polypropylene fibers and fly ash replacement on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 342, p. 127-134, 2023.

LI, H.; KAYHANIAN, M.; HARVEY, J. T. T. Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 118, p. 144-152, mar. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.016>. Acesso em: 20 mai. 2023.

LIN, C.; YU, J. Research on improving polymer pervious concrete mechanical strength by adding EVA to UP resin binder material. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 359, p. 129416, 12 dez. 2022.

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, Maio 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.137>. Acesso em: 25 jun. 2023.

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. 1-19, 16 ago. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7102>. Acesso em: 10 jun. 2022.

LUCENA, J. C. T. de. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno**: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina. 2017. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.2017.tde-30032017-104705>. Acesso em: 05 jun. 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

PHILIP, P. M.; JOSEPH, A.; KOSHY, R. Z.; JOSSY, A. Mechanical and permeability properties of basalt fiber Reinforced concrete. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, mai. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.133>. Acesso em: 26 ago. 2023.

PLIZZARI, G.; MINDESS, S. Fiber-reinforced concrete. *In*: **Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete**. 2. ed. Woodhead: Birmingham,

2019, p. 257-287. Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102616-8.00011-3>. Acesso em: 10 jun. 2023.

PUTMAN, B. J.; NEPTUNE, A. I. Comparison of test specimen preparation techniques for previous concrete pavements. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 25, n. 8, p. 3480-3485, ago. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.039>. Acesso em: 27 jun. 2023.

QIN, Y.; LI, M.; LI, Y.; MA, W.; XU, Z.; CHAI, J.; ZHOU, H. Effects of nylon fiber and nylon fiber fabric on the permeability of cracked concrete. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 274, p. 121786, mar. 2021. r BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121786>.

SABOO, S.; MUGHEIRBI, N. A.; ZEMLYANOV, D. Y.; KESTUR, U. S.; TAYLOR, L. S. Congruent release of drug and polymer: A “sweet spot” in the dissolution of amorphous solid dispersions. **Journal of Controlled Release**, Amsterdam, v. 298, p. 68-82, 28 mar. 2019.

SANTANA, A. M. C. **Estudo da influência das adições de fibra de vidro álcali-resistentes nas propriedades do concreto permeável**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2024.

SHI, T.; ZHANG, X.; HAO, H.; CHEN, C. Experimental and numerical investigation on the compressive properties of interlocking blocks. **Engineering Structures**, Oxford, v. 228, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111561>. Acesso em: 05/04/2023.

SCHUËLLER, G. I.; STIX, R. A critical appraisal of methods to determine failure probabilities. **Structural Safety**, Amsterdam, v. 4, n. 4, p. 293-309, 1987.

SCHNEIDER, V. E.; SCHMITZ, D.; CEMIN, G.; SILVA, M. D'A.; PANIZZON, T.; BORTOLIN, T. A.; FINOTTI, A. R. Usos da água na bacia do Arroio Marrecas – RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. **Anais [...]**. Porto Alegre: ABRH, 2009.

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, set. 2011.

SUN, Z.; LIN, X.; VOLLPRACHT, A. Pervious concrete made of alkali activated slag and geopolymers. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 189, p. 797-803, 20 novembro 2018.

TAN, K.; QIN, Y.; DU, T.; LI, L.; ZHANG, L.; WANG, J. Biochar from waste biomass as hygroscopic filler for pervious concrete to improve evaporative cooling performance. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 287, 123078, 2021.

TECNOSIL SOLUÇÕES ESPECIAIS. **Vantagens de utilizar:** Tecnosil Sílica Ativa Características Físicas e Químicas. Tecnosil: Itupeva, [2022?]. Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa/>. Acesso em 20 jun.2023.

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. 1-32, 20 mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i4.3063>. Acesso em: 15 jun. 2022.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. Pervious Concrete Pavements. **Portland Cement Association**, Maryland, Silver Spring, p. 36, Jan. 2004.

TOGHROLI, A.; MEHRABI, P.; SHARIATI, M.; TRUNG, N. T.; JAHANDARI, S.; RASEKH, H. 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, ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118997>. Acesso em: 14 jul. 2023.

VOTORANTIM. **Cimento todas as obras:** mapa da obra. Votorantim: Votorantim Cimentos, [2020]. Disponível em: <https://www.mapadaobra.com.br/produtos/cimentos-votoran/todas-as-obras/>. Acesso em: 06 abr. 2024.

WANG, J. The effects of urban heat islands on the environment. **Journal of Climate Studies**, [s. l], v. 12, n. 3, p. 45-60, 2019.

YANG, J.; JIANG, G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 33, n. 3, p. 381-386, mar. 2003.

ZHANG, R.; HAN, B.; LI, L.; ZHAO, Z.; ZHANG, Q.; ZHANG, Q.; NI, C.; LU, T. J. Influence of prestress on ballistic performance of bi-layer ceramic composite armors: Experiments and simulations. **Composite Structures**, London, v. 227, 2019, p. 111252.

ZHONG, R.; WILLE, K. Material design and characterization of high performance pervious concrete. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 98, p.51-60, nov. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027>.