

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JONATHAN DUARTE OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETO
PERMEÁVEL DOSADO COM O MODELO DE EMPACOTAMENTO
COMPRESSÍVEL**

**Alegrete
2025**

JONATHAN DUARTE OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETO
PERMEÁVEL DOSADO COM O MODELO DE EMPACOTAMENTO
COMPRESSÍVEL**

Defesa de Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Luis Eduardo Kostas

**Alegrete
2025**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

O48a Oliveira, Jonathan Duarte
Análise experimental das propriedades mecânicas de concreto
permeável dosado com o modelo de empacotamento compressível /
Jonathan Duarte Oliveira.
148 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2025.
"Orientação: Luis Eduardo Kostascki".

1. Concreto permeável. 2. Modelo de empacotamento
compressível. 3. Propriedades mecânicas. I. Título.

JONATHAN DUARTE OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETO PERMEÁVEL DOSADO
COM O MODELO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em:17/07/2025

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luis Eduardo Kostascki

Orientador

(Unipampa)

Prof. Dr. Carlos Eduardo Marmorato Gomes

(Unicamp)

Prof. Dr. Gersson Fernando Barreto Sandoval

(UPTC)



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO KOSTESKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/07/2025, às 17:43, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **GERSSON FERNANDO BARRETO SANDOVAL, Usuário Externo**, em 17/07/2025, às 17:49, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Carlos Eduardo Marmorato Gomes, Usuário Externo**, em 18/07/2025, às 13:28, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1779642** e o código CRC **63025321**.

Dedico este trabalho aos meus pais, Catia Adriana e José Danilo, e à minha companheira de vida, Eduarda.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conceder saúde, sabedoria e força para realizar minhas atividades ao longo desta jornada, bem como por sua constante proteção e bondade.

À Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia (PPENG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), agradeço pelo apoio institucional e financeiro. Estendo esse reconhecimento ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Farmacêuticas (PPGCF), do Campus Uruguiana, pela colaboração na caracterização de materiais utilizados nesta dissertação.

Sou grato às empresas Construtora Alegretense, Pilecco Nobre, Postes Indaial e Sílica Verde do Arroz Ltda., que generosamente contribuíram com a doação de matérias-primas essenciais para a execução da pesquisa.

Aos colegas do grupo de pesquisa Modelagem e Análise Experimental de Compósitos (MAEC), agradeço pelo apoio e acolhimento desde o início da pós-graduação, especialmente durante a extensa campanha experimental. Também agradeço aos técnicos Marcelo Oliveira e Raquel Machado pelo auxílio durante a realização dos ensaios mecânicos no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção (LEMAC).

Ao professor Ederli Marangon, meu sincero agradecimento por todas as oportunidades disponibilizadas e pelos valiosos conhecimentos compartilhados ao longo deste percurso. Em especial, agradeço ao meu orientador e amigo, professor Luis Kosteski, por seu comprometimento, orientação e constante disponibilidade. Seus conselhos foram fundamentais para a elaboração deste trabalho e para minha formação acadêmica. Trabalhar ao lado desses grandes pesquisadores tem sido uma honra.

Por fim, agradeço profundamente à minha família. À minha mãe, Catia Adriana, e ao meu pai, José Danilo, que nunca mediram esforços para me oferecer a oportunidade de estudar. Foram suas atitudes, sacrifícios e ensinamentos que me moldaram como pessoa e como profissional, e que tornaram este momento possível. À minha companheira de vida, Eduarda, por estar ao meu lado nos momentos bons e nos mais desafiadores, sempre acreditando no meu potencial e tornando meus dias

mais leves com seu cuidado e afeto. É o amor e o incentivo da minha família que me impulsionam a seguir trabalhando com empenho e motivação.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”.

Leonardo da Vinci

RESUMO

O concreto permeável surge como solução sustentável para mitigar problemas de drenagem urbana e escoamento superficial de água. Contudo, os parâmetros de dosagem, a compactação e a geometria ideal dos corpos de prova ainda não estão integralmente padronizados, o que dificulta a obtenção de um desempenho consistente. Este estudo tem como objetivo, a partir da utilização do modelo de empacotamento compressível, produzir uma mistura otimizada de concreto permeável que apresente propriedades mecânicas satisfatórias para aplicação em pavimentos com tráfego leve de veículos e, em decorrência disso, atenuar as implicações relacionadas à drenagem urbana. Inicialmente, avaliou-se uma composição de concreto permeável já existente, analisando os efeitos do formato geométrico dos espécimes, dos procedimentos de moldagem e de diferentes normas de ensaio relacionadas às propriedades mecânicas do material. Esses testes preliminares permitiram definir protocolos metodológicos que priorizassem a praticidade de execução, diminuíssem o tempo operacional em laboratório e o consumo de matérias-primas. Com base nessas informações, a pesquisa concentrou-se em encontrar uma dosagem de mistura, adotando o modelo de empacotamento compressível, capaz de maximizar o desempenho estrutural do concreto permeável, especialmente a resistência à tração na flexão. A implementação do modelo resultou na otimização das propriedades mecânicas, com destaque principal para os valores de resistência à tração na flexão, que superaram 2 MPa, valor mínimo estabelecido pela norma NBR 16416 (2015) para implementação em pavimentos sujeitos ao tráfego leve de veículos. Na sequência, foi investigada a adição de materiais silicosos à mistura otimizada. A adição de sílica proveniente da queima da casca de arroz proporcionou ganhos nas propriedades mecânicas do material, com incrementos de 5,8% na resistência à tração na flexão, 18,6% na resistência à compressão axial e 3,4% na resistência à tração indireta, em comparação à mistura de referência aos 28 dias de idade. Por fim, verificou-se boa correspondência entre os valores experimentais e aqueles estimados teoricamente por meio do método de dosagem, indicando sua confiabilidade e a viabilidade de simulações complementares para a formulação de novas composições.

Palavras-Chave: Concreto permeável, Modelo de empacotamento compressível; Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Pervious concrete emerges as a sustainable solution to mitigate urban drainage problems and surface water runoff. However, dosage parameters, compaction, and the ideal geometry of test specimens are still not fully standardized, which hinders the achievement of consistent performance. This study aims, through the use of the compressible packing model, to produce an optimized pervious concrete mixture that presents satisfactory mechanical properties for application in pavements with light vehicle traffic and, as a result, attenuates issues related to urban drainage. Initially, an existing pervious concrete composition was evaluated by analyzing the effects of the geometric shape of the specimens, molding procedures, and different test standards related to the mechanical properties of the material. These preliminary tests allowed the definition of methodological protocols that prioritized execution practicality, reduced operational time in the laboratory, and decreased raw material consumption. Based on this information, the research focused on finding a mix dosage, using the compressible packing model, capable of maximizing the structural performance of pervious concrete, especially its flexural tensile strength. The implementation of the model resulted in the optimization of mechanical properties, with particular emphasis on flexural tensile strength values, which exceeded 2 MPa, minimum value established by NBR 16416 (2015) for use in pavements subjected to light vehicle traffic. Subsequently, the addition of siliceous materials to the optimized mixture was investigated. The addition of silica obtained from rice husk ash provided improvements in the mechanical properties of the material, with increases of 5.8% in flexural tensile strength, 18.6% in axial compressive strength, and 3.4% in splitting tensile strength compared to the reference mixture at 28 days of age. Finally, a good correspondence was observed between the experimental values and those theoretically estimated by means of the dosage method, indicating its reliability and the feasibility of complementary simulations for the formulation of new compositions.

Keywords: Pervious concrete; Compressible packing model; Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Inundações: (a) capital Porto Alegre e (b) cidade de Alegrete.....	21
Figura 2.1 – Estrutura esquemática com os tópicos abordados na revisão bibliográfica.....	26
Figura 2.2 – Sistemas de pavimentos permeáveis: (a) infiltração total do escoamento no solo, (b) infiltração parcial e (c) nenhuma infiltração	29
Figura 2.3 – Porosidade ao longo da profundidade vertical	39
Figura 2.4 - Taxa de infiltração de água: (a) dimensões do anel de infiltração e (b) montagem do teste em um bloco de concreto permeável (400x400x200 mm).....	40
Figura 2.5 – ASTM C1701 modificada utilizando anel de infiltração com diâmetro de 100 mm: (a) amostra cilíndrica e (b) laje.....	41
Figura 2.6 – Instrumentação para a realização de ensaio de tração na flexão em vigota de concreto permeável.....	44
Figura 2.7 - Densidade de empacotamento virtual: (a) cubos, (b) esferas CFC, (c) esferas CCC e (d) esfera CS.....	50
Figura 2.8 - Diferentes classes dominantes em uma mistura binária: (a) partículas grandes dominantes e (b) partículas pequenas dominantes.....	51
Figura 2.9 Efeito de afastamento exercido por um grão menor em um empacotamento de grão maior	51
Figura 2.10 - Efeito de parede exercido por um grão maior em um empacotamento de grão menor	52
Figura 2.11 - Configuração de ensaio e organização dos materiais pré e pós-empacotamento	56
Figura 2.12 - Efeito de parede do recipiente cilíndrico sobre os agregados.....	57
Figura 2.13 – Compactação do concreto permeável com rolo: (a) pavimento e (b) calçada experimental.....	62
Figura 3.1 – Partículas do agregado graúdo.....	66
Figura 3.2 – Areia grossa.....	67
Figura 3.3 - Curva granulométrica dos agregados.....	67
Figura 3.4 - Curva granulométrica dos aglomerantes.....	68
Figura 3.5 - Ensaio de densidade de empacotamento no agregado graúdo.....	74
Figura 3.6 - Ensaio de densidade de empacotamento na areia.....	75

Figura 3.7 - Procedimento de moldagem do concreto permeável utilizado nesta pesquisa: (a) peso do molde vazio, (b) molde preenchido e compactado, (c) molde pesado para verificação da massa, (d) adição de mais concreto e nova compactação e (e) obtenção do valor de massa de projeto.....	79
Figura 3.8 - Corpos de prova confeccionados a partir da dosagem com o MEC: (a) cubos de 150x150x150 mm e (b) prismas de 100x100x400 mm.....	79
Figura 3.9 - Ensaio de densidade e porosidade: (a) massas das amostras em condição seca e (b) massas submersas.....	80
Figura 3.10 - Ensaio de taxa de infiltração de água: (a) anel de infiltração plástico posicionado na área central do cubo e (b) água adicionada ao anel durante o ensaio	82
Figura 3.11 - Ensaio de tração na flexão em quatro pontos: (a) configuração do carregamento e (b) instrumentação do corpo de prova.....	83
Figura 3.12 - Ensaio de resistência à compressão axial.....	84
Figura 3.13 - Ensaio de resistência à tração indireta.....	85
Figura 3.14 - Distribuição vertical da porosidade: (a) esquematização do bloco de 150 mm, (b) fatias do bloco de 150 mm, (c) esquematização do bloco de 100 mm e (d) fatias do bloco de 100 mm.....	86
Figura 4.1 - Relação entre densidade endurecida e porosidade para as misturas: (a) referência, (b) com adição de NS e (c) com adição de SCA.....	90
Figura 4.2 – Densidade em relação ao nº de amostra para as três misturas analisadas: (a) cubos com 150 mm de altura e (b) cubos com 100 mm de altura.....	91
Figura 4.3 - Curvas carga-deslocamento aos 28 dias: (a) concreto de referência, (b) concreto com adição de NS e (c) concreto com adição de SCA	94
Figura 4.4 - Curva carga-deslocamento aos 56 dias do concreto com adição de SCA	95
Figura 4.5 – Aspecto após o término do processo de mistura: (a) mistura de referência, (b) mistura com adição de NS e (c) mistura com adição de SCA.....	96
Figura 4.6 – Trajetos de fissuração na ruptura dos corpos de prova testados em flexão: (a) corpos de prova referência, (b) corpos de prova com adição de NS e (c) corpos de prova com adição de SCA.....	97
Figura 4.7 - - Resistência média à compressão para o concreto permeável dosado com o MEC	98

Figura 4.8 – Trajetos de fissuração na ruptura dos corpos de prova testados em compressão: (a) corpos de prova de referência, (b) corpos de prova com adição de NS e (c) corpos de prova com adição de SCA	100
Figura 4.9 - Resistência média à tração indireta para o concreto permeável dosado com o MEC	101
Figura 4.10 - Trajetos de fissuração na ruptura dos corpos de prova testados em tração indireta: (a) amostras de referência, (b) amostras com adição de NS e (c) amostras com adição de SCA.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resumo de estudos sobre a influência da granulometria nas propriedades do concreto permeável	31
Tabela 2.2 – Influência de materiais aglomerantes suplementares no desempenho do concreto permeável	35
Tabela 2.3 – Parâmetros e resultados de taxa de infiltração de água em concretos permeáveis segundo a literatura	42
Tabela 2.4 – Síntese de estudos sobre a resistência mecânica do concreto permeável em diferentes composições de mistura	45
Tabela 2.5 – Valores de K para variados protocolos de empacotamento.....	54
Tabela 3.1 – Propriedades físicas do agregado graúdo.....	66
Tabela 3.2 – Caracterização química dos aglomerantes.....	69
Tabela 3.3 – Parâmetros necessários para o registro do cimento.....	73
Tabela 3.4 – Parâmetros necessários para o registro dos agregados.....	73
Tabela 3.5 – Densidade de empacotamento para os três intervalos granulométricos do agregado graúdo.	74
Tabela 3.6 – Densidade de empacotamento para os três intervalos granulométricos da areia.....	75
Tabela 3.7 - Resultados de resistência à compressão axial para as duas misturas prévias de concreto permeável com agregado graúdo utilizado	76
Tabela 4.1 – Densidade média no estado endurecido e porosidade para a mistura de referência e para as misturas com adição de NS e de SCA	89
Tabela 4.2 – Resistência média à tração na flexão e módulo de elasticidade para o concreto permeável dosado com o MEC	93
Tabela 4.3 - Comparativo do ganho de resistência à compressão axial em relação ao consumo de aglomerante.....	99
Tabela 4.4 – Comparação entre valores teóricos e experimentais das propriedades mecânicas da mistura de referência aos 28 dias	103
Tabela 4.5 - Comparação entre valores teóricos e experimentais das propriedades mecânicas da mistura com adição de 3% de SCA aos 28 dias.....	103
Tabela 4.6 - Parâmetros simulados para composições com resistência mínima à tração de 2 MPa.....	105

LISTA DE SIGLAS

ACI - American Concrete Institute

ASCE - American Society of Civil Engineers

ASTM - American Society for Testing and Materials

CT 306 - Comitê Técnico IBRACON de Pavimentos de Concreto

EUA – Estados Unidos da América

FHWA - Federal Highway Administration

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LVDT - Linear Variable Differential Transformer

MEC - Modelo de Empacotamento Compressível

NPDES - National Pollutant Discharge Elimination System

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Objetivos	23
1.1.1	Objetivos gerais	23
1.1.2	Objetivos específicos.....	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1	Evolução e potencial do concreto permeável na gestão de águas pluviais	27
2.2	Materiais.....	28
2.2.1	Agregados.....	30
2.2.2	Aglomerantes	32
2.2.3	Aditivos	36
2.3	Propriedades físicas e mecânicas	37
2.3.1	Densidade e porosidade	37
2.3.2	Taxa de infiltração de água	39
2.3.3	Propriedades mecânicas	42
2.4	Métodos de dosagem do concreto permeável.....	47
2.5	Modelo de empacotamento compressível	48
2.5.1	Densidade de empacotamento virtual.....	49
2.5.2	Abordagem teórica da densidade de empacotamento real	53
2.5.3	Determinação experimental da densidade de empacotamento real	55
2.5.3.1	Empacotamento de grãos com dimensões maiores que 100 µm	55
2.5.3.2	Empacotamento de grãos com dimensões menores que 100 µm	58
2.5.4	Contribuição dos agregados maiores que 100 µm nas propriedades mecânicas.....	59
2.6	Compactação do concreto permeável.....	61

3	MATERIAIS E MÉTODOS	65
3.1	 Materiais	65
3.1.1	 Agregados	65
3.1.2	 Aglomerantes	67
3.1.3	 Aditivos	69
3.2	 Metodologia	69
3.2.1	 Testes preliminares com a mistura de concreto permeável desenvolvida por Costa et al. (2018)	70
3.2.2	 Dosagem da mistura pelo modelo de empacotamento compressível	72
3.2.2.1	 Parâmetros necessários para inserir os materiais no BétonlabPro 3 ..	73
3.2.2.2	 Composição da mistura resultante e avaliação dos efeitos da adição de NS e SCA no concreto permeável	76
3.2.3	 Procedimento de mistura com e sem adição de material silicoso	77
3.2.4	 Moldagem, compactação e cura das amostras	78
3.2.5	 Caracterização física do concreto permeável	80
3.2.6	 Caracterização mecânica do concreto permeável	82
3.2.6.1	 Ensaio de resistência à tração na flexão em quatro pontos ..	82
3.2.6.2	 Ensaio de resistência à compressão axial	84
3.2.6.3	 Ensaio de resistência à tração indireta	84
3.2.7	 Efeito de distribuição vertical da densidade e porosidade	85
3.2.8	 Simulações de misturas por meio do software BétonlabPro 3	87
4	 RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
4.1	 Densidade no estado endurecido e porosidade do concreto permeável ..	88
4.2	 Taxa de infiltração de água	92
4.3	 Resistência à tração na flexão em quatro pontos	93
4.4	 Resistência à compressão axial	98
4.5	 Resistência à tração indireta	101

4.6	Resultados das simulações de misturas através do <i>software</i> BétonLab pro	
3.....	102
5	CONCLUSÃO	106
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	109
	REFERÊNCIAS.....	111
	APÊNDICE A – TESTES PRELIMINARES	121

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, houve uma elevação exponencial no índice de urbanização no território brasileiro. Na maior parte dos casos, esse processo aconteceu sem a elaboração de um planejamento adequado, especialmente em relação às expansões desordenadas em zonas de preservação ambiental permanente. Para enfatizar essa situação, os dados mais recentes disponibilizados pelo Censo (IBGE, 2022) apontam que em torno de 178 milhões de pessoas residem em áreas urbanas, representando uma taxa de urbanização de 87,4%.

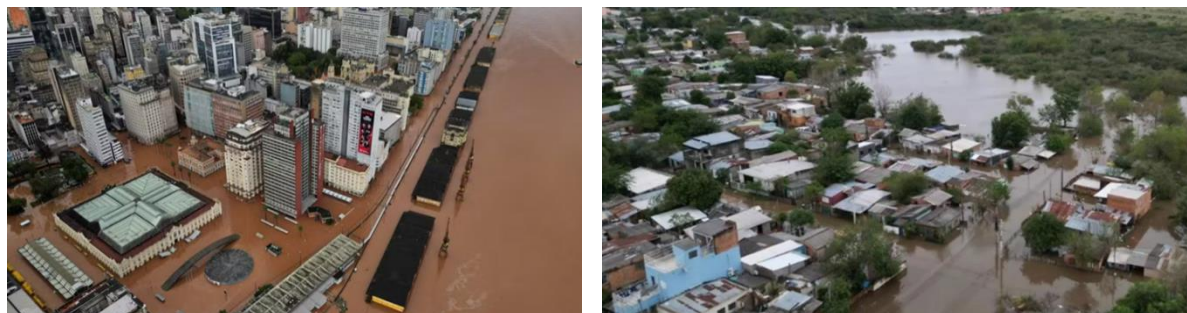
Os principais danos decorrentes desse processo acelerado de urbanização incluem: aumento do escoamento superficial e da intensidade das inundações devido à impermeabilização do solo; redução da umidade do solo, que leva à diminuição da recarga dos lençóis freáticos; e a formação de inúmeras poças d'água nas ruas e calçadas, causando transtornos para pedestres e motoristas (Feng *et al.*, 2021). Além disso, a ineficiência na execução da coleta e destinação final dos resíduos sólidos aumenta a carga de poluentes transportada através do escoamento superficial, contribuindo para a obstrução dos sistemas de drenagem e a contaminação dos corpos d'água. Esse cenário afeta diretamente o abastecimento de água, o transporte e o tratamento dos esgotos sanitário e pluvial. (Lohri *et al.*, 2017).

Conforme a divulgação da Agência Senado (2024), um mapeamento realizado pela Casa Civil e pelo Ministério das Cidades identificou que 1942 dos 5570 municípios brasileiros - mais de um terço do total - possuem moradores em áreas de alta vulnerabilidade, onde o risco de eventos naturais extremos, como deslizamentos, enxurradas e inundações, é reconhecidamente elevado. Comparado ao levantamento executado em 2012, o número de municípios com populações suscetíveis a esses desastres aumentou 136%, evidenciando a intensificação do problema ao longo dos anos. Nesse mesmo contexto, entre 1991 e 2022, foram registrados 8,7 milhões de desabrigados e desalojados em razão de eventos hidrológicos e deslizamentos de terra.

Um exemplo recente e de grandes proporções ocorreu em maio de 2024, quando o estado do Rio Grande do Sul foi severamente impactado por desastres relacionados ao clima. A Figura 1.1 ilustra os casos de inundação na (a) capital Porto

Alegre e (b) na cidade de Alegrete, situada na fronteira oeste do estado, região do presente estudo.

Figura 1.1 – Inundações: (a) capital Porto Alegre e (b) cidade de Alegrete.



(a)

(b)

Fonte: (a) Reuters (2024) e (b) Prefeitura Municipal de Alegrete (2024).

O grande desafio urbano atual consiste, fundamentalmente, em encontrar um equilíbrio entre as necessidades de desenvolvimento e os aspectos de sustentabilidade. Para que isso ocorra, tornou-se essencial a elaboração de mecanismos que minimizem o escoamento superficial ou materiais alternativos que beneficiem o processo de infiltração da água. Nessa conjuntura, está inserido o concreto permeável, que é um material desenvolvido para restaurar a capacidade de infiltração do solo. De acordo com Adresi *et al.* (2023), esse tipo de dispositivo possibilita a rápida drenagem da água durante períodos de chuva, direcionando-a para infiltração no solo ou para escoamento por um sistema de drenagem auxiliar, permitindo seu reaproveitamento. No entanto, sua aplicação exige uma atuação interdisciplinar, envolvendo tanto a implementação do pavimento permeável quanto o aprimoramento dos sistemas tradicionais de drenagem que, em sua maioria, foram projetados no século passado e encontram-se obsoletos para atender às demandas atuais da sociedade.

O uso do concreto permeável como pavimento oferece uma série de benefícios, tanto para a sociedade em geral quanto para o meio ambiente, os quais podem ser alcançados imediatamente ou a longo prazo. Um dos aspectos positivos é a sua capacidade de purificar a água da chuva, filtrando impurezas e contaminantes por meio da retenção nos seus poros interconectados. Estudos de Khankhaje *et al.* (2023) relatam que o processo de drenagem minimiza os níveis de metais pesados, como cádmio, cobre, chumbo e zinco, na água. Segundo Rodrigues *et al.* (2022), uma outra

valência desse pavimento é a mitigação da poluição sonora nos ambientes adjacentes. Devido à sua estrutura aberta, o concreto permeável absorve as ondas sonoras derivadas da circulação dos veículos, reduzindo a intensidade do ruído provocado pelo tráfego. Além disso, a aplicação do concreto permeável auxilia na transferência de energia entre as diferentes camadas do pavimento, o que contribui para atenuar o efeito de ilha de calor urbana, prevenindo o aquecimento demasiado da superfície nas grandes cidades (VUJOVIC *et al.*, 2021). Somado a isso, conforme análise efetuada por Ahmed e Hoque (2020), a principal vantagem desse material é sua habilidade de controlar e gerenciar a drenagem da água, bem como possibilitar a recarga dos reservatórios subterrâneos, contribuindo, por sua vez, para a redução dos riscos de inundações.

Diante de todos esses benefícios, observa-se que a utilização do concreto permeável está intimamente alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), contribuindo para o manejo eficiente da água, a promoção de cidades mais seguras, resilientes e sustentáveis, além da mitigação dos impactos gerados pelas mudanças climáticas.

O concreto permeável é composto por uma estrutura porosa formada por agregado graúdo e uma pequena camada de pasta de cimento, com poros internos distribuídos aleatoriamente e sem uniformidade. É importante lembrar que o agregado miúdo, normalmente, é utilizado em quantidade reduzida ou até mesmo eliminado, pois isso facilita a formação dos poros, que são justamente os condutores da água através da estrutura. Por outro lado, essa particularidade de possuir uma grande quantidade de vazios, acarreta em uma diminuição considerável na resistência mecânica do material (Shan *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2021).

Algumas variáveis do concreto permeável ainda não estão totalmente compreendidas e padronizadas, como parâmetros de dosagem e compactação, geometria ideal dos corpos de prova e normas técnicas específicas para a determinação de suas propriedades mecânicas. A literatura apresenta diversas abordagens sobre esses aspectos, dificultando o estabelecimento de padrões para sua execução e para garantir um desempenho mecânico satisfatório aliado à manutenção de suas características hidráulicas. Nessa linha, o modelo de empacotamento compressível (MEC), elaborado por De Larrard (1999), trata da resolução do quesito de empacotamento de misturas secas entre todos os componentes usados na dosagem de concreto. Seu princípio teórico baseia-se na

interação entre os diferentes segmentos de tamanho presentes em uma mistura granular, impactando a densidade geral do concreto. Neste trabalho, o MEC é adotado como ferramenta técnica central para o desenvolvimento de uma dosagem otimizada, voltada ao aprimoramento do desempenho mecânico do concreto permeável, com aplicação fundamentada em princípios científicos, dispensando a necessidade de processos repetitivos de tentativa e erro.

Dessa maneira, analisar esses fatores e encontrar uma composição adequada para a maximização do desempenho do concreto permeável são passos essenciais para atingir resultados consistentes, que possibilitem expandir sua implementação além do tráfego de pedestres, ampliando seu uso para o tráfego leve de veículos, considerando os materiais disponíveis.

1.1 Objetivos

Nesta seção são exibidos os objetivos propostos para o trabalho, subdivididos em objetivo geral, que define a finalidade principal da pesquisa, e objetivos específicos, que abordam aspectos individuais necessários para a complementação da investigação.

1.1.1 Objetivo geral

Este estudo tem como escopo obter uma mistura otimizada de concreto permeável utilizando o modelo de empacotamento compressível, garantindo propriedades mecânicas suficientes para aplicação em pavimentos destinados ao tráfego leve de veículos e, conseqüentemente, contribuir para a mitigação dos problemas relacionados à drenagem urbana.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho foram delimitados levando em consideração uma série de fatores cruciais para viabilizar o objetivo geral. Além do aprimoramento da mistura, busca-se estabelecer diretrizes para as práticas laboratoriais, a fim de facilitar a análise das propriedades físicas e mecânicas do concreto permeável. Para tanto, os objetivos foram organizados na seguinte ordem:

- a) Verificar diferentes geometrias de corpos de prova e normas aplicáveis à execução dos ensaios mecânicos, visando otimizar os procedimentos de moldagem e estratégias de ensaio;
- b) Encontrar uma metodologia de dosagem eficiente para produzir, a partir de matérias-primas disponíveis, uma mistura otimizada de concreto permeável capaz de suportar as solicitações do tráfego leve de veículos;
- c) Averiguar as propriedades físicas do material, incluindo densidade, porosidade e taxa de infiltração de água;
- d) Avaliar o comportamento mecânico do concreto permeável por meio de ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, resistência à tração indireta e determinação do módulo de elasticidade;
- e) Utilizar a adição de micro e nanosílica com o propósito de aprimorar as propriedades mecânicas do concreto permeável;
- f) Examinar a correspondência entre os valores obtidos experimentalmente para a mistura e aqueles previstos teoricamente pelo método de dosagem.

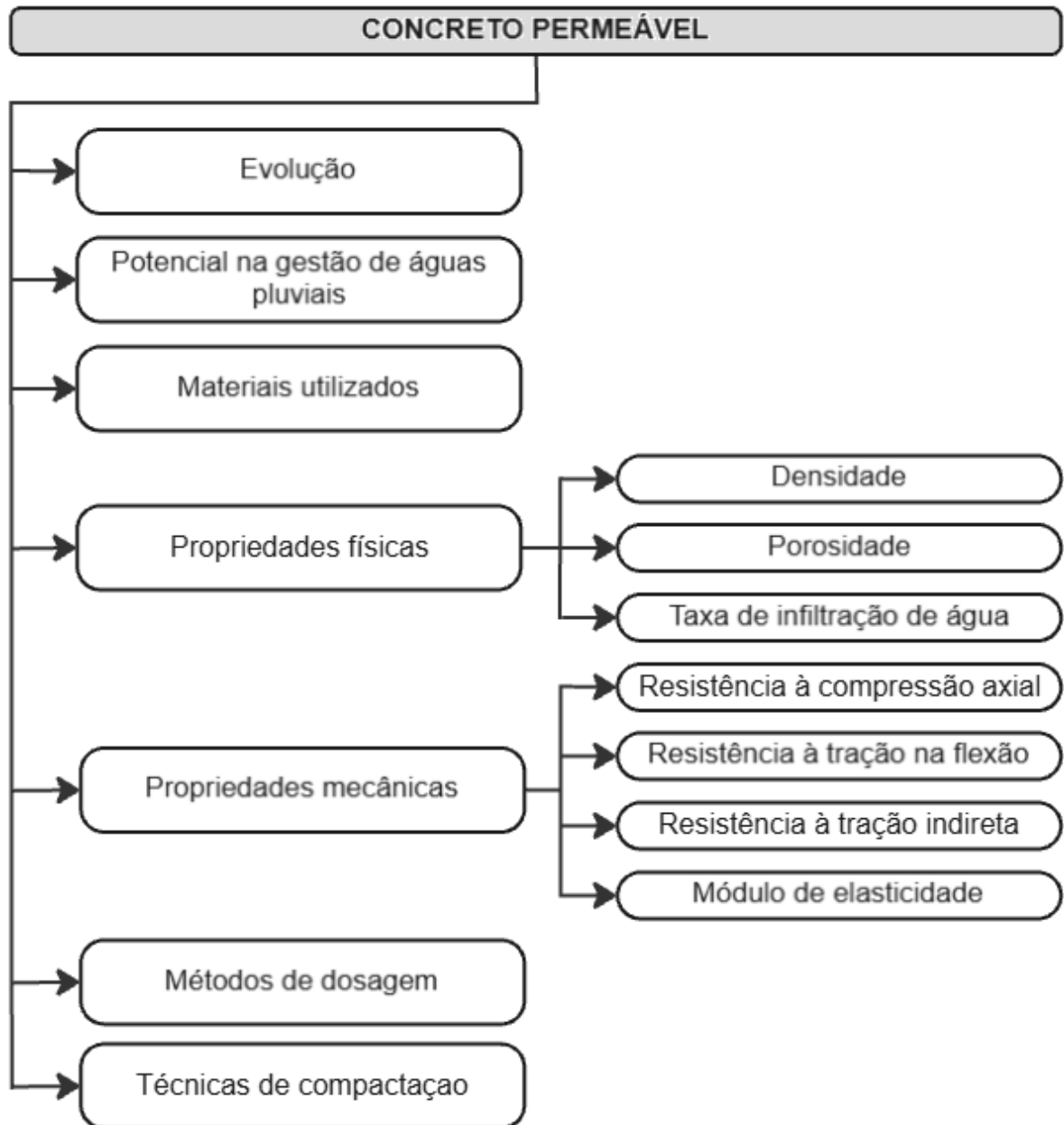
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo propõe uma revisão sistemática dos principais conceitos relacionados à temática do concreto permeável. Para isso, foram utilizadas duas bases de dados científicos amplamente reconhecidas: Science Direct e Scopus. Na Figura 2.1, é apresentado um esquema que organiza visualmente os tópicos que nortearam a revisão realizada. Inicialmente, aborda-se sua evolução e seu potencial na drenagem urbana sustentável. Na sequência, discutem-se os materiais utilizados, suas propriedades hidráulicas e mecânicas, bem como os métodos de dosagem e as técnicas de compactação. Dessa maneira, a finalidade deste capítulo é proporcionar uma base conceitual para subsidiar a compreensão das variáveis e dos estudos propostos nesta dissertação.

Para a realização da busca bibliográfica, foram estabelecidos como critérios de inclusão: estudos recentes disponíveis nas bases citadas, referentes ao concreto permeável e publicados preferencialmente entre 2020 e 2025. Artigos mais antigos também foram considerados, desde que contribuíssem para maior robustez do embasamento teórico. Como critério de exclusão, foram desconsiderados trabalhos sem aderência direta às variáveis investigadas nesta pesquisa ou com ausência de informações completas. Enquanto, as palavras-chave empregadas variaram de acordo com o tema de cada item em que a sistematização foi implementada, sendo detalhadas a seguir, associadas às respectivas seções temáticas:

- “2.2.1 Agregados”: *pervious concrete; size aggregate; coarse aggregate; fines; sand.*
- “2.2.2 Aglomerantes”: *pervious concrete; geopolymers; supplementary cementitious; fly ash; silica fume; rice husk ash; nanomaterials; nanosilica.*
- “2.3.1 Densidade e porosidade”: *pervious concrete; effect porosity; vertical porosity distribution.*
- “2.3.2 Taxa de infiltração de água”: *pervious concrete; infiltration rate; ASTM C1701; clogging.*
- “2.3.3 Propriedades mecânicas”: *pervious concrete; mechanical properties.*
- “2.5 Compactação do concreto permeável”: *pervious concrete; compaction effort; molding methods.*

Figura 2.1 – Estrutura esquemática com os tópicos abordados na revisão bibliográfica.



Fonte: Elaboração própria (2025).

2.1 Evolução e potencial do concreto permeável na gestão de águas pluviais

A maior parte dos sistemas de drenagem tradicionais foi projetada e desenvolvida em séculos passados, funcionando como uma medida de captação do escoamento pluvial por meio de condutos que, posteriormente, o distribuem para cursos d'água adjacentes ou para redes de esgoto. Com o rápido crescimento das grandes cidades, muitos desses sistemas tornaram-se inadequados para atender à demanda exigida, além de frequentemente apresentarem custos elevados (GRIGG, 2024). Diante desse contexto, a aplicação de pavimentos de concreto permeável se estabelece como uma técnica atrativa, viabilizando uma melhor infiltração da água no solo e auxiliando no controle do escoamento desde sua fonte inicial. De acordo com a *American Society of Civil Engineers* (ASCE, 2015), o concreto permeável é um material com abatimento (*slump*) aproximadamente zero e granulometria aberta, constituído por cimento Portland, agregado graúdo, pouca ou nenhuma porção de agregado miúdo, aditivos e água. Essa combinação resulta em uma estrutura com diversos poros interconectados, permitindo a rápida infiltração da água pluvial no solo subjacente e/ou o seu armazenamento nas camadas de suporte do pavimento.

A implementação da tecnologia do concreto permeável está fortemente alinhada aos ODS da ONU, com destaque para o ODS 6 (Água potável e saneamento), ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima). O concreto permeável contribui para a gestão sustentável da água ao reduzir o escoamento superficial e viabilizar a recarga dos lençóis freáticos, controlando de forma eficiente a drenagem urbana. Sua matriz porosa ainda permite a retenção de poluentes, colaborando com a purificação da água da chuva. Em zonas urbanas, esse material também auxilia na diminuição dos impactos de catástrofes naturais, como enchentes e deslizamentos de terra, protegendo principalmente as populações em situação de vulnerabilidade. Desse modo, está diretamente associado ao ODS 11, na questão de promover cidades mais seguras, resilientes e sustentáveis. Em relação ao ODS 13, o concreto permeável apresenta potencial para mitigar os efeitos das alterações climáticas, especialmente ao aliviar o fenômeno de ilha de calor urbana - atenuando o aquecimento superficial excessivo, principalmente em regiões de clima quente - e oferecer um dispositivo eficaz de gerenciamento climático, sobretudo em países menos desenvolvidos.

No Brasil, o mecanismo do concreto permeável começou a ser abordado há pouco mais de uma década, sendo fortemente disseminado em grupos de pesquisa universitários em virtude de sua relevância no atual cenário do país. Em comparação com os EUA, que são uma referência no desenvolvimento desse material, ainda existe um déficit referente à normalização técnica específica e a guias detalhados de projeto. Para evidenciar a juventude do tema no Brasil, vale salientar que a primeira norma sobre esse tipo de pavimento, a NBR 16416, foi disponibilizada somente em 2015, estabelecendo os requisitos mínimos exigíveis ao projeto, especificação, execução e manutenção de pavimentos permeáveis de concreto.

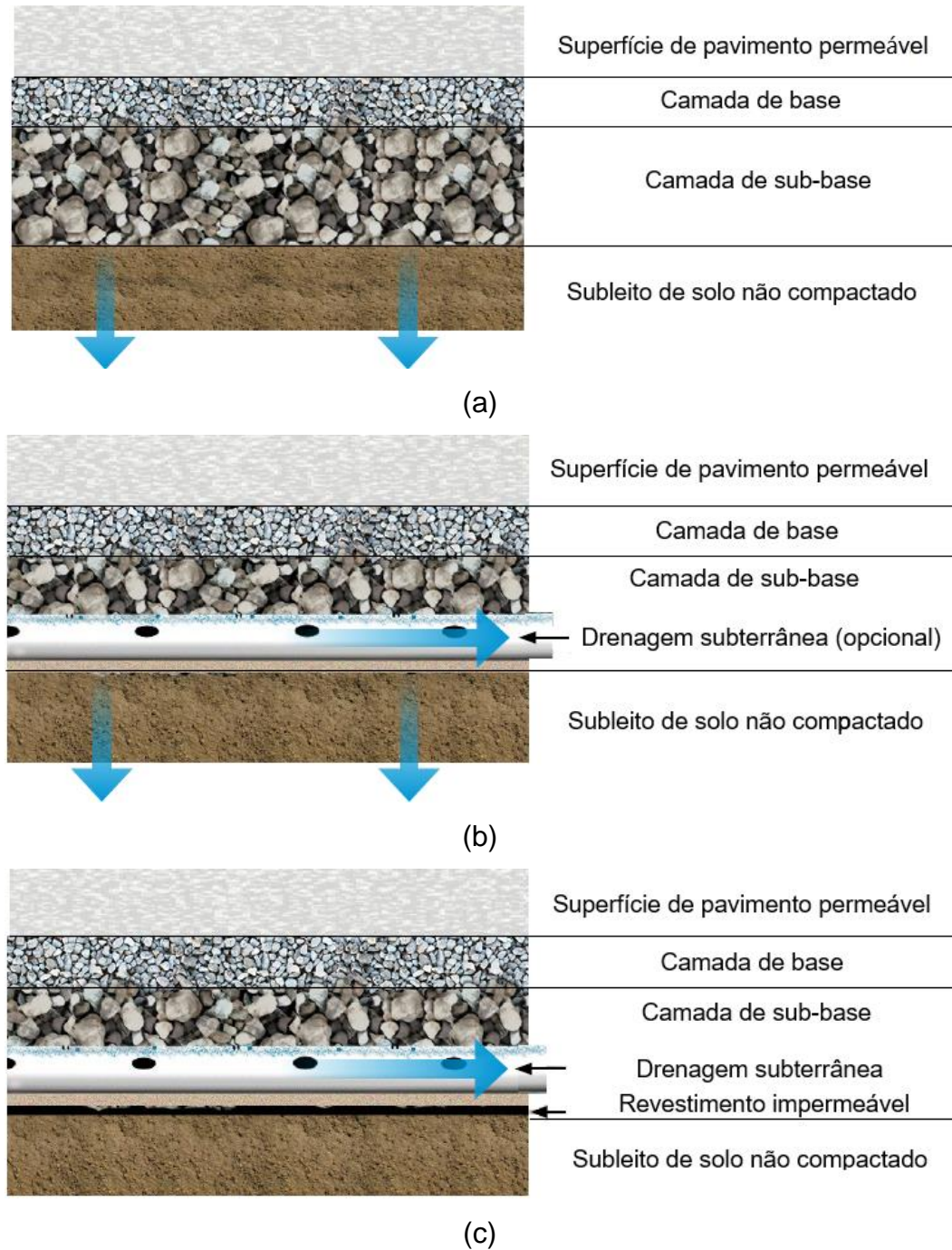
Os pavimentos permeáveis oferecem superfícies adequadas para a gestão de águas pluviais, tanto em áreas municipais quanto em aplicações na iniciativa privada, sendo reconhecidos como uma Melhor Prática de Gestão de Águas Pluviais (*Stormwater Best Management Practice*) pelo *National Pollutant Discharge Elimination System* (NPDES, 2021). Como ilustrado na Figura 2.2, os sistemas de pavimentos permeáveis podem ser projetados de três maneiras distintas: infiltração total do escoamento no solo (a), infiltração parcial (b) e nenhuma infiltração (c). A opção de projeto com infiltração total é normalmente escolhida em áreas de solo arenoso, que possuem alta permeabilidade. Por outro lado, as variantes de infiltração parcial ou nenhuma infiltração servem para armazenar a água em suas camadas de base e sub-base, com a retirada sendo realizada através de drenos. A água retida pode ser reutilizada para fins que não exigem potabilidade, não necessitando obrigatoriamente ser encaminhada para tubulações de drenagem. Essas duas últimas opções são recomendadas em ocasiões em que o solo apresenta permeabilidade muito baixa (argilas ou siltes) ou há risco de contaminação dos aquíferos (ASCE, 2015).

2.2 Materiais

Para a composição do concreto permeável, normalmente são empregados agregado graúdo, cimento e água. A principal diferença em relação ao concreto convencional é a característica de minimizar ou eliminar a quantidade de agregado miúdo (areia) na mistura, tendo em vista que sua presença tende a prejudicar a conexão entre os poros e a permeabilidade da estrutura (*Federal Highway Administration – FHWA*, 2012; ADRESI *et al.*, 2023). Além desses materiais, também podem ser utilizados outros constituintes, como aditivos e materiais aglomerantes

suplementares, visando aprimorar as propriedades mecânicas, a trabalhabilidade e a integridade estrutural do elemento. Nos itens a seguir, serão discutidos todos os materiais mencionados para a confecção desse tipo de concreto.

Figura 2.2 – Sistemas de pavimentos permeáveis: (a) infiltração total do escoamento no solo, (b) infiltração parcial e (c) nenhuma infiltração.



Fonte: Adaptado de ASCE (2015).

2.2.1 Agregados

O *American Concrete Institute* (ACI PRC-522-23, 2023) sugere que os agregados usados no concreto permeável, sejam eles cúbicos ou lamelares, apresentem graduação única ou variem na faixa de 19 e 9,5 mm. Em contrapartida, com a finalidade de obter ganhos de resistência mecânica e um melhor acabamento superficial, existem vertentes da literatura que indicam o emprego de agregados graúdos com frações entre 9,5 e 2,36 mm (YANG *et al.*, 2007; NGUYEN *et al.*, 2014; COSTA *et al.*, 2018; NAJAH *et al.*, 2021).

É importante mencionar que as propriedades físicas desses materiais, dentre elas distribuição, forma e tamanho, interferem diretamente o desempenho em termos de durabilidade, resistência mecânica e capacidade de infiltração do pavimento de concreto permeável. Por exemplo, concretos permeáveis preparados com agregados de menor número de angularidade, ou seja, mais arredondados, possuem menor permeabilidade, porém maior resistência à compressão, à tração na flexão e à tração indireta, quando comparados aos preparados com agregados lamelares (JAIN e CHOUHAN, 2011; MAGUESVARI e NARASIMHA, 2013). Os agregados empregados devem atender às prescrições e requisitos especificados nas normas NBR 7211 (2022) e ASTM C33/C33M (2023), que são essenciais para assegurar um comportamento apropriado para a estrutura produzida.

Diversos autores examinaram a influência de composições granulométricas diferentes nas propriedades do concreto permeável. Em geral, as pesquisas verificaram que as misturas confeccionadas com agregados menores tendem a apresentar melhorias significativas nas propriedades de resistência. Por outro lado, observou-se, em alguns casos, uma redução acentuada na condutividade hidráulica dessas misturas, em relação àquelas compostas por agregados de maior dimensão. A Tabela 2.1 exibe um resumo de descobertas da literatura, salientando as faixas granulométricas avaliadas e o desempenho atingido em termos de propriedades mecânicas e hidráulicas.

Tabela 2.1 – Resumo de estudos sobre a influência da granulometria nas propriedades do concreto permeável. Abreviaturas: CA = compressão axial, TF = tração na flexão, TI = tração indireta e PE = permeabilidade.

Autor	Faixas granulométricas avaliadas	Melhor desempenho mecânico	Melhor desempenho hidráulico
Joshi e Dave (2022b)	4,75-10 mm/10-20 mm	4,75-10 mm CA = 7,5 MPa (+25,9%)	10-20 mm PE = 1,9 cm/s (+6,4%)
Singh e Madasamy (2022)	2,36-12,5 mm/2,36-20mm	2,36-12,5 mm CA = 29 MPa (+10,1%) TF = 3,8 MPa (+4,6%)	2,36-20mm PE = 1,3 cm/s (+42,1%)
Chockalingam <i>et al.</i> (2023)	4,75-10 mm/10-12,5 mm/16-20 mm	4,75-10 mm CA = 5,6 MPa (+14,3%) TF = 1,9 MPa (+11,8%) TI = 0,8 MPa (+14,3%)	-
Dauksys <i>et al.</i> (2023)	4-16 mm/8-16 mm	4-16 mm CA = 14,3 MPa (+47,4%)	8-16 mm PE = 3,1 cm/s (+3,7%)
Feric <i>et al.</i> (2023)	4-8 mm/8-16 mm	4-8 mm CA = 13 MPa (+34,3%) TI = 1,7 MPa (+4,3%)	8-16 mm PE = 2,2 cm/s (+26,7%)
Luo <i>et al.</i> (2023)	6-10 mm/10-15 mm/15-30 mm	6-10 mm CA = 6,2 MPa (+24%) TI = 0,8 MPa (+5,3%)	15-30 mm PE = 1,6 cm/s (+34,7%)
Risson <i>et al.</i> (2024)	2,36-9,5 mm/2,36-19 mm	2,36-9,5 mm CA = 19 MPa (+18,7%) TF = 2,2 MPa (+15,8%)	2,36-19 mm PE = 0,4 cm/s (+35,7%)
Castro e Carasek (2025)	4,75-12,5 mm/9,5-19 mm	4,75-12,5 mm CA = 17,3 MPa (+26,2%) TF = 2,4 MPa (+24,1%)	9,5-19 mm PE = 0,6 cm/s (+63,8%)

Fonte: Elaboração própria (2025).

De modo limitado, considerando que um excesso pode comprometer a infiltração da água no concreto permeável, o agregado miúdo pode ser inserido à mistura para originar um possível acréscimo na resistência mecânica. Ali e Rashid (2024) examinaram os efeitos da incorporação de diferentes porcentagens (de 0 a 20%, em incrementos de 5%) de areia grossa na composição dos agregados. Com a adição de 20%, a resistência à compressão foi aumentada consideravelmente, atingindo uma média de 19 MPa. Paralelamente, comparada à mistura de referência,

que não contém material fino, a porosidade diminuiu de 26,6% para 16,7%, embora ainda permanecendo dentro da zona padrão de 15-35%, tida como adequada para essa estrutura (ACI PRC-522-23, 2023). Os autores enfatizam que a adição controlada de até 20% de areia grossa no concreto permeável tem potencial de desenvolver uma mistura otimizada, melhorando seus atributos mecânicos sem comprometer os requisitos básicos de permeabilidade. No estudo de Nazeer, Kapoor e Singh (2022), que empregou areia média, foram testadas adições de 10% e 20%. Novamente, o teor máximo resultou em um acréscimo de 17% na resistência à compressão, alcançando um valor de 12 MPa aos 28 dias de idade, apesar de ter provocado uma consequente diminuição na capacidade drenante, porém mesmo assim a mistura atendeu os limites de permeabilidade recomendados para concreto permeável.

Em uma mistura com relação água/cimento de 0,3 e compactação executada por 10 golpes de martelo Marshall em uma única camada, Bonicelli, Giustozzi e Crispino (2015) avaliaram a substituição de 5% e 10% do total de agregado graúdo por areia fina. Para o maior índice de substituição, a resistência à tração indireta por compressão diametral aumentou 1,6 vezes em relação à mistura controle, enquanto o coeficiente de permeabilidade diminuiu de 0,25 cm/s para 0,13 cm/s. Esses resultados indicam que a incorporação de areia fina potencializa a resistência mecânica do concreto permeável, mas deve ser manejada com cautela, visto que pode minimizar significativamente a drenabilidade do material. Pradhan e Behera (2022) também investigaram a substituição parcial do agregado graúdo por areia, em pequenas proporções de 5%, 7% e 9%. O estudo revelou que a substituição de 9% proporcionou a máxima resistência à compressão, de 12,1 MPa, além de atender ao parâmetro mínimo exigido de porosidade, com valor de 21,4%.

2.2.2 Aglomerantes

O cimento Portland é o ligante hidráulico mais amplamente aplicado como aglomerante em concretos permeáveis. Esse tipo de concreto apresenta uma estrutura interna constituída por macroporos interconectados, gerada a partir da aglomeração das partículas de agregados por intermédio de uma fina camada de pasta de cimento Portland, que as une em determinadas regiões de contato. Segundo a norma ASTM C150/C150M (2022), o cimento Portland *Type I* é o mais difundido na

produção do concreto permeável, assemelhando-se bastante ao cimento brasileiro CP I e ao CP V, conforme especificado pela NBR 16697 (2018), no que diz respeito à alta quantidade de clínquer em sua composição, combinada com uma menor presença de adições.

Atualmente, como alternativa ao cimento Portland, vêm sendo estudados os aglomerantes geopoliméricos na produção do concreto permeável (HUANG e WANG, 2021; AZAD *et al.*, 2022; LUO *et al.*, 2023). Esses materiais, compostos por elementos ricos em alumino-silicatos, como o metacaulim e a escória de alto-forno, reagem com soluções alcalinas, formando um gel de elevada resistência. Nesse sentido, além de proporcionarem boas propriedades mecânicas e durabilidade à estrutura, os geopolímeros permitem a reutilização de resíduos industriais, configurando uma abordagem mais sustentável para a construção civil (SHIRAI *et al.*, 2022).

Materiais aglomerantes suplementares, mais comumente cinza volante, sílica ativa e sílica proveniente da queima da casca do arroz, podem ser adicionados ao concreto permeável como substituição parcial do cimento, visando melhorar a resistência da matriz cimentícia (ACI 522R-10, 2010). De acordo com a pesquisa conduzida por Huang, Luo e Khan (2020), é fundamental que as proporções de inserção desses materiais sejam minuciosamente dosadas. Isso garante que, além de aprimorar as propriedades mecânicas da estrutura através da reação pozolânica, que aumenta a formação de hidrato de silicato de cálcio (C-S-H) e densifica a pasta de cimento, não haja comprometimento acentuado da trabalhabilidade e da condutividade hidráulica do concreto permeável.

A Tabela 2.2 apresenta, de maneira sintetizada, pesquisas que examinaram o emprego de materiais aglomerantes suplementares em concretos permeáveis, evidenciando os teores ótimos de substituição, os parâmetros estudados e as respectivas variações nos desempenhos mecânicos e hidráulicos. De forma geral, os resultados mostram que a incorporação desses materiais tende a aprimorar consideravelmente as propriedades de resistência do concreto, embora ocorra, em paralelo, uma redução na capacidade de permeabilidade. Todavia, quando aplicados em proporções adequadas, proporcionam um equilíbrio entre a funcionalidade drenante e as propriedades mecânicas do concreto permeável, tornando-o apropriado para aplicações em pavimentação sustentável.

Os nanomateriais são constituídos por elementos sólidos com dimensões no intervalo de 1 a 100 nm, o que resulta em uma grande área superficial devido ao seu

tamanho extremamente pequeno, conferindo-lhes maior reatividade química e promovendo o aperfeiçoamento mecânico de materiais compósitos (METAXA *et al.*, 2021). Quando se trata do concreto permeável, o emprego de nanomateriais, como a nanosílica, tem potencial não apenas para maximizar sua resistência, mas também sua durabilidade em relação a impactos e ataques químicos. Isso se deve ao fato de a nanosílica atuar no refinamento e na densificação da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado graúdo.

Mohammed *et al.* (2018), Shirgir *et al.* (2011) e Tarangini, Sravana e Rao (2022) estudaram a adição de nanosílica em misturas de concreto permeável. Todos os trabalhos constataram que a incorporação de nanosílica reduz a trabalhabilidade da mistura, exigindo um maior teor de aditivo superplastificante para compensar essa perda. Tarangini, Sravana e Rao (2022) testaram a inclusão de 3% de nanosílica em misturas com relação água/cimento de 0,3 e 0,7% de superplastificante em relação à massa de materiais cimentícios. Com isso, observaram melhorias de aproximadamente 7,8% no módulo de elasticidade e 25,9% na resistência à compressão, consequência de uma conexão mais eficiente entre as partículas na matriz cimentícia. No estudo executado por Mohammed *et al.* (2018), a adição de nanosílica foi avaliada nos valores de 1%, 2% e 3%, sendo que, para assegurar a dispersão uniforme do nanomaterial, este foi adicionado a água da mistura gradualmente e submetido a agitação intensa. Os autores afirmaram que a nanosílica tende a melhorar a resistência à compressão, contudo não especificaram a magnitude desse acréscimo. Já Shirgir *et al.* (2011), utilizando uma relação água/cimento elevada de 0,38, observaram que a incorporação de nanosílica promoveu efeitos significativos na melhoria das propriedades mecânicas do material, especialmente nas resistências à compressão e à flexão, além de certa diminuição da permeabilidade, em razão do preenchimento dos poros pelo nanomaterial.

Ramadhansyah *et al.* (2020) submeteram a cinza da casca do arroz a um processo de moagem, visando obter partículas em escala nanométrica, que apresentaram dimensões entre 64 nm e 85 nm. Nesse cenário, foi identificado um teor ótimo de substituição em torno de 10%, no qual os valores de resistência à compressão subiram 6,5%, enquanto a porosidade permaneceu muito próxima à da mistura de controle. A partir desse ponto, observou-se uma diminuição da resistência mecânica com o aumento do índice de substituição, possivelmente relacionada à

redução da trabalhabilidade da mistura, devido à insuficiência de água para garantir a adequada hidratação da pasta cimentícia.

Tabela 2.2 – Influência de materiais aglomerantes suplementares no desempenho do concreto permeável. Abreviaturas: CA = compressão axial, TF = tração na flexão, TI = tração indireta e PE = permeabilidade.

Autor	% ótima/material	Desempenho mecânico	Desempenho hidráulico
Aoki <i>et al.</i> (2012)	20% de cinza volante	CA = 10,1 MPa (+14,6%)	PE = 1,2 cm/s (-18,8%)
Saboo <i>et al.</i> (2019)	15% de cinza volante	CA = 8,5 MPa (+88,9%)	PE = 2,4 cm/s (-22,6%)
Wang <i>et al.</i> (2019)	20% de cinza volante	CA= 34 MPa (+34,2%)	PE = 0,7 cm/s (-5,6%)
Singh <i>et al.</i> (2023)	20% de cinza volante	CA = 33 MPa (+11,1%) TF = 4,1 MPa (+6,7%) TI = 3,9 MPa (+8,2%)	PE = 0,7 cm/s (-15,6%)
Subramaniam e Sathiparan (2023)	10% de cinza volante	CA = 17 MPa (+21,4%)	PE = 0,3 cm/s (-50%)
Liu <i>et al.</i> (2019)	12% de sílica ativa	CA = 25,3 MPa (+14%)	PE = 0,4 cm/s (-2,3%)
Adil, Kevern e Mann (2020)	5% de sílica ativa	CA = 21,6 MPa (+30,3%)	-
Bilal <i>et al.</i> (2021)	10% de sílica ativa	CA = 27,5 MPa (+7,8%) TI = 2,4 MPa (+8,9%)	PE = 0,6 cm/s (-18,1%)
Pradhan e Behera (2022)	8% de sílica ativa	CA = 18,2 MPa (+51,7%) TF = 2,4 MPa (+90,5%) TI = 2,1 MPa (+50%)	-
Seeni <i>et al.</i> (2024)	15% de sílica ativa	CA = 31,6 MPa (17%) TF = 4,1 MPa (+12,3%) TI = 4 MPa (+13,6%)	PE = 1,2 cm/s (-8,9%)
Hesami <i>et al.</i> (2014)	8% de sílica da casca do arroz	CA = 17,6 MPa (+27,5%)	-
Shafabakhsh e Ahmadi (2016)	8% de sílica da casca do arroz	CA = 19 MPa (+33,8%) TF = 2,7 MPa (+28,6%) TI = 1,8 MPa (+38,5%)	PE = 0,2 cm/s (-12%)
Adamu <i>et al.</i> (2021)	10% de sílica da casca do arroz	CA = 7,3 MPa (+37,7%)	PE = 1 cm/s (-12,7%)
Subramaniam e Sathiparan (2023)	5% de sílica da casca do arroz	CA = 19 MPa (+35,7%)	PE = 0,5 cm/s (-11,5%)

Fonte: Elaboração própria (2025).

2.2.3 Aditivos

O uso de aditivos retardadores de pega e superplastificantes é uma prática recorrente na formulação de misturas de concreto permeável, porque auxiliam na estabilização da hidratação do cimento, viabilizando a manutenção de uma baixa relação água/cimento e melhorando a fluidez do concreto, resultando assim em uma pasta de cimento com consistência adequada. Ademais, aditivos com outras funções, como modificadores de viscosidade e redutores de água, também podem agir positivamente no concreto permeável (ACI PRC-522-23, 2023).

Com a modernização da indústria de aditivos, estão disponíveis para comercialização produtos direcionados especificamente para o concreto permeável, conhecidos como modificadores de reologia, que disponibilizam inúmeras atribuições em uma única solução, eliminando a dependência de aditivos complementares. Os modificadores de reologia são capazes de controlar a hidratação do cimento, ampliar a trabalhabilidade e facilitar a etapa de compactação (GCP AT, 2024; NAZAR *et al.*, 2020). Como alternativa à ausência desses aditivos, segundo destacado pelo Comitê Técnico IBRACON de Pavimentos de Concreto (CT 306, 2024) é possível combinar modificadores de viscosidade com superplastificantes, conferindo aumento da viscosidade da pasta de cimento, para promover maior uniformidade na mistura e minimizar a suscetibilidade à segregação dos materiais.

O ASCE (2015) aponta que, independentemente da opção adotada, as proporções de água e aditivo devem ser rigorosamente gerenciadas, pois influenciam diretamente a resistência mecânica, devido ao impacto na acomodação da mistura no molde, o que afeta a densidade e a porosidade projetadas. Quantidades equivocadas, seja por excesso ou por insuficiência, podem prejudicar de forma significativa o resultado final. O excesso, por exemplo, origina uma mistura demasiadamente fluida, prejudicando a permeabilidade ou enfraquecendo a interface entre a pasta e os agregados, diminuindo a resistência do material. Por outro lado, a insuficiência pode ocasionar uma mistura seca de baixa trabalhabilidade, dificultando a compactação e a coesão, além de elevar a probabilidade de segregação, comprometendo a integridade do concreto permeável.

2.3 Propriedades físicas e mecânicas

Nos itens subsequentes, serão discutidas as propriedades físicas do concreto permeável, incluindo sua densidade, porosidade e taxa de infiltração de água, relacionadas às características dos poros, além das propriedades mecânicas, como resistência à compressão, tração na flexão, tração indireta e módulo de elasticidade.

2.3.1 Densidade e porosidade

O ACI PRC-522-23 (2023) menciona que a densidade do concreto permeável, definida como a massa por unidade de volume, é dependente dos materiais integrantes da mistura e da energia de compactação implementada, sendo crucial para o controle da operação de moldagem, tanto em campo quanto em laboratório, levando em consideração que influencia diretamente a porosidade do elemento. Essa propriedade também condiciona aspectos importantes, como a durabilidade e a resistência do concreto permeável, com valores superiores resultando em menores vazios e, ao mesmo tempo, maior resistência a fraturas. Entretanto, convém lembrar que densidades exageradas podem comprometer severamente a capacidade de infiltração da água, extinguindo a funcionalidade do pavimento permeável para drenagem. Geralmente, a densidade do concreto permeável situa-se entre 1700 e 2150 kg/m³ (ALI e RASHID, 2024; CASTRO e CARAZEK, 2025; FERIC *et al.*, 2023).

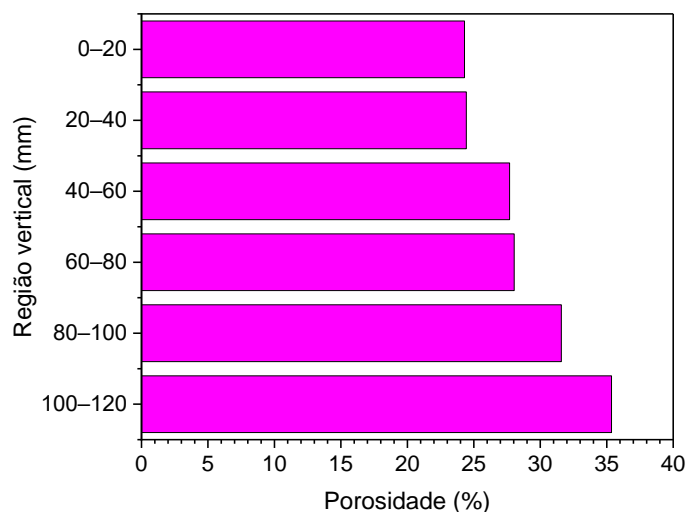
A densidade e a porosidade são propriedades interligadas e fundamentais no concreto permeável. Na maioria das vezes, essas variáveis possuem uma relação inversamente proporcional, pois à medida que a densidade aumenta, a porosidade decresce, e vice-versa, comportamento amplamente observado em estudos especializados (ADRESI *et al.*, 2023; AKKAYA e ÇAGATAY, 2021; ARCOLEZI *et al.*, 2023; EL-HASSAN *et al.*, 2019).

Por sua vez, a porosidade trata-se da relação entre o volume de vazios e o volume total de uma amostra, sendo o principal agente na estruturação dos poros do concreto permeável. Tipicamente, os valores estão compreendidos entre 15% e 35%, associados a fatores como as características da pasta de cimento e o grau de compactação, analogamente à densidade, também tendo papel expressivo na determinação da permeabilidade e resistência mecânica do material (LIU *et al.*, 2018; ACI PRC-522-23, 2023). Conforme Wang *et al.* (2019), é indicado trabalhar com

valores de porosidade próximos a 20% em concretos permeáveis direcionados ao gerenciamento de águas pluviais, considerando que essa faixa fornece um balanceamento ideal entre as propriedades físicas e mecânicas. A norma ASTM C1754/C1754M (2012), específica para concreto permeável, define os procedimentos necessários para mensurar, em laboratório, a densidade e o conteúdo de vazios no estado endurecido.

A dimensão e a distribuição dos poros, bem como a variação da porosidade ao longo da altura, são componentes de complexa identificação e exercem importante influência no comportamento do concreto permeável, especialmente na modificação de sua aptidão drenante em função da profundidade. Essa variação é comandada, majoritariamente, pela compactação do corpo de prova quando realizada em uma única camada, resultando em menor porosidade na face compactada (topo) e acréscimo de porosidade na face inferior (MARTIN III; KAYE; PUTMAN, 2014). Nesse contexto, Rao *et al.* (2020) verificaram esse fenômeno ao analisar uma mistura com relação agregado/cimento de 3,7:1, relação água/cimento de 0,27 e a incorporação de 3,5% de aditivo modificador de viscosidade em relação à massa de cimento, aplicando uma compactação estática apenas na camada superior de uma estrutura com 120 mm de altura. Como resultado, a porosidade oscilou em 46% entre o topo e a base, devido à insuficiência de energia de compactação nas camadas inferiores, acarretando valores de resistência compressiva menores que 10 MPa. O efeito da porosidade vertical foi averiguado cortando seis seções horizontais de 20 mm de espessura do espécime, onde os resultados revelaram que os valores variaram entre 24,3% e 35,4% no decorrer da profundidade (Figura 2.3). Enquanto isso, as particularidades dos poros foram obtidas mediante análise digital de imagens, que indicaram uma diminuição de 40% no número de poros no comparativo topo-base. Além do mais, o diâmetro médio dos poros aumentou de 3,5 mm no topo para 4,9 mm na base.

Figura 2.3 – Porosidade ao longo da profundidade vertical.

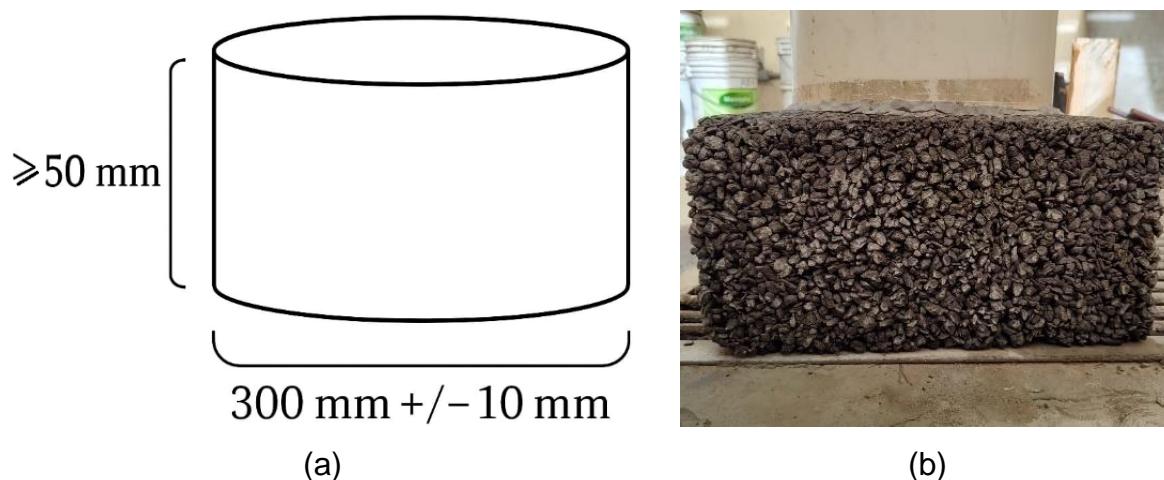


Adaptado de Rao *et al.* (2020).

2.3.2 Taxa de infiltração de água

Uma maneira eficaz de avaliar a performance hidráulica de pavimentos permeáveis é a partir da propriedade de taxa de infiltração, que estima a velocidade de penetração da água no meio poroso através da superfície. A aferição dessa taxa atende às diretrizes preconizadas pela norma ASTM C1701/C1701M (2017), com o uso de um anel de infiltração possuindo 300 mm de diâmetro e 50 mm de altura (Figura 2.4(a)). A base do anel é selada para certificar que o fluxo ocorra somente em seu interior, levando em conta o tempo demandado para que um determinado volume de água escoe pela estrutura (Figura 2.4(b)). Esse ensaio permite verificar a aptidão do concreto permeável no manejo hídrico das águas precipitadas e contribui no monitoramento da perda de capacidade de infiltração dos pavimentos com o passar do tempo, advinda do efeito de colmatação dos poros decorrente da deposição de sedimentos transportados durante o escoamento superficial (Opiso *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2020; Sandoval *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2021). O ACI PRC-522-23 (2023) classifica a faixa usual de taxa de drenagem entre 6120 mm/h (0,17 cm/s) e 43200 mm/h (1,20 cm/s), oscilando em função da dimensão dos agregados e da densidade da mistura, enquanto a NBR 16416 (2015) menciona valores mínimos de 3600 mm/h (0,10 cm/s) para pavimentos recém-construídos.

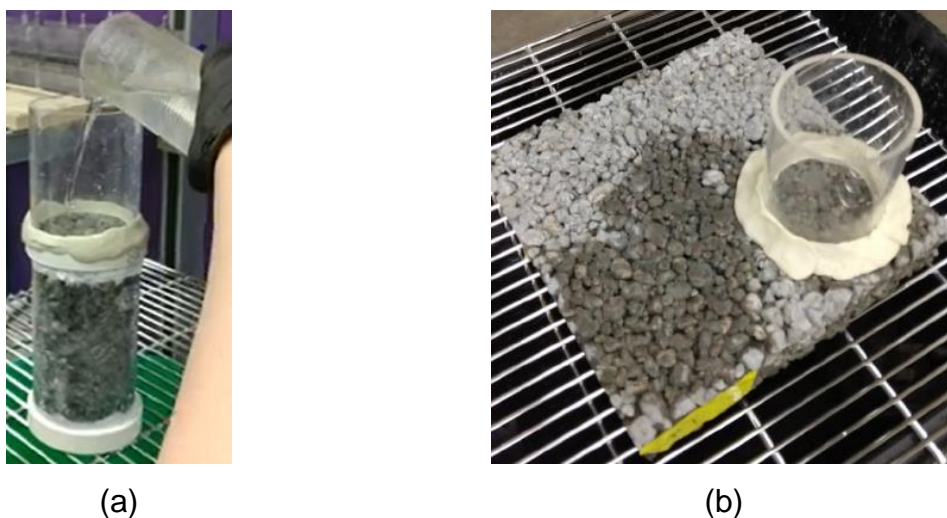
Figura 2.4 - Taxa de infiltração de água: (a) dimensões do anel de infiltração e (b) montagem do teste em um bloco de concreto permeável (400x400x200 mm).



Fonte: (a) Adaptado de ASTM C1701/C1701M (2017) e (b) Elaboração própria (2024).

Com a finalidade de viabilizar a execução da verificação em espécimes menores, como cilindros, cubos e lajes de concreto permeável, alguns autores propuseram uma adaptação no ensaio, por intermédio da diminuição do diâmetro do anel de infiltração. Lederle *et al.* (2022) implementaram uma modificação usando um anel com diâmetro de 100 mm, testando lajes com 75 mm de espessura e amostras cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Para evitar vazamentos laterais de água, os cilindros foram revestidos com filme plástico termoencolhível. De maneira análoga, AlShareedah *et al.* (2019) e Strieder *et al.* (2022) também empregaram, ao longo de seus experimentos, anéis com 100 mm de diâmetro para a avaliação da taxa de infiltração de água em corpos de prova cilíndricos. Em outro estudo, adotou-se um anel com diâmetro de 150 mm para testar cinco misturas, uma de referência (sem agregado miúdo), e outras com adição de até 20% de areia grossa, em intervalos de 5% (ALI e RASHID, 2024). A Figura 2.5 ilustra o procedimento ASTM C1701 modificado em amostra cilíndrica (a) e em laje (b).

Figura 2.5 – ASTM C1701 modificada utilizando anel de infiltração com diâmetro de 100 mm: (a) amostra cilíndrica e (b) laje.



Fonte: Lederle *et al.* (2022).

A Tabela 2.3 expõe estudos que analisaram a capacidade drenante do concreto permeável através do ensaio de taxa de infiltração de água, destacando a faixa granulométrica e a porosidade-alvo adotadas, o método de compactação aplicado e o diâmetro do anel de infiltração fixado à superfície do elemento. Foi verificado que, mesmo com porosidade e granulometria semelhantes, há divergências nos valores de infiltração. Essa variação está possivelmente relacionada ao acabamento da camada superficial do pavimento de concreto permeável, que pode estar mais aberta ou fechada, sendo impactada principalmente pelo método e pela energia de compactação empregados, como observado, por exemplo, em Hu *et al.* (2020) e Joshi e Dave (2022a). De modo abrangente, as taxas de infiltração reportadas oscilaram entre 7128 mm/h e 72720 mm/h, indicando grande amplitude de desempenho hidráulico em função das escolhas metodológicas implementadas.

Tabela 2.3 - Parâmetros e resultados de taxa de infiltração de água em concretos permeáveis segundo a literatura.

Autor	Faixa granulométrica e porosidade-alvo	Método de compactação	Diâmetro do anel de infiltração (mm)	Taxa de infiltração de água (mm/h)
Gupta (2014)	2,36-14 mm e 20% de vazios	Rolo compactador (camada única)	300	60000
Costa <i>et al.</i> (2018)	2,36-12,5 mm e 25% de vazios	Rolo compactador (camada única)	300	13500
AlShareedah <i>et al.</i> (2019)	2,36-9,5 mm e 15% de vazios	Martelo de borracha (duas camadas)	100	11810
Opiso <i>et al.</i> (2019)	15–19 mm	Rolo compactador (camada única)	300	16607
Hu <i>et al.</i> (2020)	5-10 mm e 20% de vazios	Rolo compactador (camada única)	300	34956
Sandoval <i>et al.</i> (2020)	2,36-9,5 mm	Rolo compactador (camada única)	300	20700
Batezini <i>et al.</i> (2021)	2,36-12,5 mm e 25% de vazios	Rolo compactador (camada única)	300	19559
Silva <i>et al.</i> (2021)	4,75-12,5 mm e 27% de vazios	Rolo compactador (camada única)	300	46080- 57240
Joshi e Dave (2022a)	4,75-10 mm e 20% de vazios	Haste de adensamento e rolo compactador	280	7128
Lederle <i>et al.</i> (2022)	2,36-19 mm e 27% de vazios	Soquete Proctor (duas camadas)	100	36450-63360
Strieder <i>et al.</i> (2022)	2,36-12,5 mm e 20% de vazios	Soquete Proctor (três camadas)	100	13239
Ali e Rashid (2024)	9,5-19 mm (0-20% de areia) e 17-27% de vazios	Soquete Proctor (duas camadas)	150	9360-47520
Brasileiro <i>et al.</i> (2024)	2,36-9,5 mm e 16% de vazios	Rolo compactador (camada única)	300	72720

Fonte: Elaboração própria (2025).

2.3.3 Propriedades mecânicas

O desempenho drenante de um pavimento permeável é de suma importância para garantir sua eficiência operacional. Porém, a resistência mecânica permanece

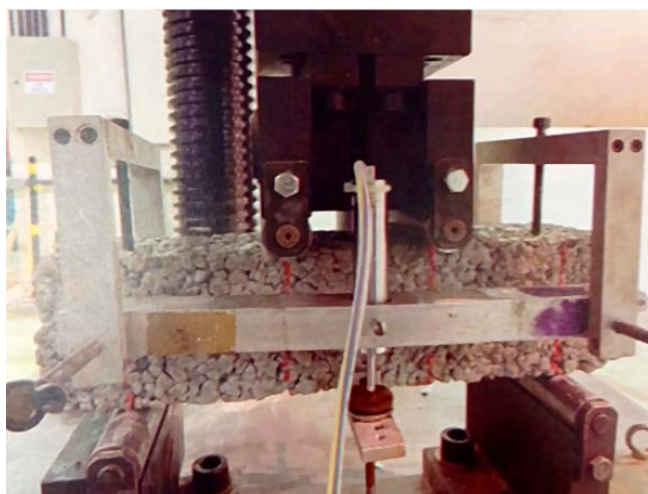
como uma das propriedades mais relevantes desse material, em razão de limitar sua aplicabilidade para suportar carregamentos sem que aconteçam deformações excessivas ou ruptura do mesmo. A resistência à tração na flexão é essencial para estabelecer os tipos de solicitação em que os pavimentos de concreto permeável moldados *in loco* podem atuar. A NBR 16416 (2015) indica uma resistência mínima de 1 MPa e uma espessura mínima de 60 mm para zonas de tráfego de pedestres, como áreas de lazer, calçadas, parques e praças públicas. Para vias de tráfego leve, com circulação preferencial de veículos leves, como automóveis, motocicletas e utilitários, permitindo ocasionalmente o tráfego de caminhões e ônibus em número limitado, a norma exige uma resistência mínima de 2 MPa e espessura mínima de 100 mm. A norma também especifica que a tração na flexão necessita ser ensaiada anteriormente à execução do pavimento, através da moldagem de corpos de prova prismáticos de 100x100x400 mm, com o adensamento do material reproduzindo o procedimento previsto para o campo, assegurando que os valores de densidade encontrados em laboratório sejam próximos aos obtidos em campo. Isso garante que as condições laboratoriais reflitam com precisão as circunstâncias reais de obra.

A resistência à compressão axial, com valores habitualmente variando entre 2,8 e 28 MPa, é fortemente influenciada pelo conteúdo de vazios, pelo esforço de compactação durante o preenchimento dos moldes, pelas proporções da mistura e pelo tamanho dos agregados (ACI PRC-522-23, 2023). Segundo o experimento conduzido por Sha *et al.* (2024), ao ajustar a composição da mistura e modificar os materiais constituintes, observou-se que um aumento da porosidade de 12% para 27%, representando um incremento de 15%, gerou um decréscimo em torno de 40% na resistência à compressão. Esse dado indica que o equilíbrio entre porosidade e resistência é um fator crítico na concepção do concreto permeável. Embora a resistência à tração indireta, que se baseia na aplicação gradual de carga compressiva ao longo do comprimento da amostra e ocasiona esforços de tração perpendiculares à linha de incidência da carga, tenha uma menor abordagem no contexto do concreto permeável, esse ensaio é muitas vezes usado para analisar o desempenho estrutural à tração e a propagação de fissuras no elemento. Contudo, não existem normativas específicas para balizar valores desta propriedade para o concreto permeável.

De acordo com o CT 306 (2024), o módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico crucial para determinar a capacidade de um pavimento permeável em resistir aos esforços impostos e sua habilidade de suportar deformações sem sofrer

danos. O módulo é mensurado na região linear do diagrama tensão-deformação, por meio da variação da deformação específica correspondente. No entanto, devido à porosidade do material e a sua conseqüente irregularidade superficial, torna-se difícil a fixação dos aparatos convencionais para a estimativa das deformações, o que praticamente inviabiliza a colagem e a utilização de *strain-gauges*. Como alternativa promissora para a obtenção do módulo de elasticidade, o CT 306 (2024) sugere a realização de ensaios de tração na flexão, com a instrumentação do corpo de prova empregando *yokes* associados a *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT), para medir o deslocamento vertical no vão central da estrutura prismática, conforme mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Instrumentação para a realização de ensaio de tração na flexão em vigota de concreto permeável.



Fonte: CT 306 (2024).

A Tabela 2.4 apresenta uma série de pesquisas que examinaram as propriedades mecânicas do concreto permeável, considerando diferentes consumos de cimento (C_c), consumos de agregados (C_a), relações água/cimento (a/c) e faixas de porosidade, com variações nos intervalos de aproximadamente 240-480 kg/m³, 1020-2030 kg/m³, 0,26-0,40 e 12-31%, respectivamente. A partir desses dados, observou-se que os valores de resistência à compressão reportados resultam em uma média próxima de 14 MPa, com ampla maioria dos valores inferiores a 20 MPa, o que se justifica devido ao caráter poroso do material, com elevado índice de vazios e baixa ou nula presença de agregado miúdo na composição. As resistências à tração na

flexão e a tração indireta apresentaram médias de 2,5 MPa e 1,7 MPa, respectivamente.

Adicionalmente, foi constatado que misturas com maior consumo de cimento tendem a alcançar resistências mais elevadas, desde que associadas a relações a/c reduzidas e porosidades controladas. Outro aspecto relevante é a incorporação de aglomerantes suplementares, que têm mostrado efeitos favoráveis sobre as propriedades mecânicas, especialmente quando utilizados em teores otimizados e compatíveis com as particularidades de cada mistura.

Tabela 2.4 - Síntese de estudos sobre a resistência mecânica do concreto permeável em diferentes composições de mistura.

Autor	Composição da mistura	Compressão (MPa)	Tração na flexão (MPa)	Tração indireta (MPa)
Shirgir <i>et al.</i> (2011)	$C_c = 325 \text{ kg/m}^3$ (5% de nanosílica); $C_a = 1480 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,38$	13-19,3	2,8-4,1	-
Hesami <i>et al.</i> (2014)	$C_c = 340 \text{ kg/m}^3$ (8% de sílica da casca do arroz); $C_a = 1500 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,27$	13,8-17,6	-	-
Costa <i>et al.</i> (2018)	$C_c = 371 \text{ kg/m}^3$; $C_a = 1484 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,26$; 29% de porosidade	7,5	2,2	-
AlShareedah <i>et al.</i> (2019)	$C_c = 285 \text{ kg/m}^3$; $C_a = 1640 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,34$; 16% de porosidade	15,8	2,3	1,5
Saboo <i>et al.</i> (2019)	$C_c = 314 \text{ kg/m}^3$ (15% de cinza volante); $C_a = 1568 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,33$; 24-31% de porosidade	4,5-8,5	-	-
Adil, Kevern e Mann (2020)	$C_c = 343 \text{ kg/m}^3$ (5% de sílica ativa); $C_a = 1525 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,27$	16,6-21,6	-	-
Rao <i>et al.</i> (2020)	$C_c = 402 \text{ kg/m}^3$; $C_a = 1539 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,27$; 28,6% de porosidade	10	-	-
Adamu <i>et al.</i> (2021)	$C_c = 241 \text{ kg/m}^3$ (10% de sílica da casca do arroz); $C_a = 1328 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,4$; 20% de porosidade	5,3-7,3	-	-
Batezini <i>et al.</i> (2021)	$C_c = 374 \text{ kg/m}^3$; $C_a = 1660 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,3$; 25% de porosidade	7,5-8,4	2-2,2	1,2-1,4

Silva <i>et al.</i> (2021)	$C_c = 310 \text{ kg/m}^3$; $C_a = 1550 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,29$; 27% de porosidade	11,7	3,3	1,5
Joshi e Dave (2022b)	$C_c = 350 \text{ kg/m}^3$; $C_a = 1400 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,3$; 24,1-24,9% de porosidade	6-7,5	-	-
Nazeer, Kapoor e Singh (2022)	5:1 (agregado:cimento); $a/c = 0,35$	10-12	-	-
Pradhan e Behera (2022)	$C_c = 479 \text{ kg/m}^3$ (8% de sílica ativa); $C_a = 1648 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,34$; 21,4% de porosidade	12-18,2	1,3-2,4	1,4-2,1
Strieder <i>et al.</i> (2022)	$C_c = 484 \text{ kg/m}^3$; $C_a = 1452 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,3$; 16,8-20,1% de porosidade	22,4	2,2	-
Tarangini, Sravana e Rao (2022)	$C_c = 450 \text{ kg/m}^3$ (3% de nanosílica); $C_a = 1647 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,3$	27-34	-	-
Arcolezi <i>et al.</i> (2023)	5:1 (agregado:cimento); $a/c = 0,26$; 26-35% de porosidade	13,8-18,4	-	-
Chockalingam <i>et al.</i> (2023)	$C_c = 320 \text{ kg/m}^3$; $C_a = 1024 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,3$	4,9-5,6	1,7-1,9	0,7-0,8
Dauksys <i>et al.</i> (2023)	$C_c = 350 \text{ kg/m}^3$; $C_a = 2030 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,34$; 24,7-24,8% de porosidade	9,7-14,3	-	-
Feric <i>et al.</i> (2023)	$C_c = 339 \text{ kg/m}^3$; $C_a = 1530 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,32$; 25,7-27,9% de porosidade	9,7-13	-	1,6-1,7
Luo <i>et al.</i> (2023)	$C_c = 288 \text{ kg/m}^3$; $C_a = 1440 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,34$; 26,8-28,7% de porosidade	5-6,2	-	0,8
Sandoval e Pieralisi (2023)	$C_c = 420 \text{ kg/m}^3$; $C_a = 1369 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,34$; 19-25% de porosidade	9,5-10,2	1,6-2,9	-
Singh <i>et al.</i> (2023)	$C_c = 430 \text{ kg/m}^3$ (20% de cinza volante); $C_a = 1521 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,34$; 16,2-17,2% de porosidade	29,7-33	3,8-4,1	3,6-3,9
Ali e Rashid (2024)	4,47:1 (agregado:cimento); $a/c = 0,3$; 16,7-26,6% de porosidade	11,1-19	-	-
Brasileiro <i>et al.</i> (2024)	$C_c = 375 \text{ kg/m}^3$; $C_a = 1499 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,3$; 16% de porosidade	16,1	2,5	-

Oliveira e Costa (2024)	$C_c = 371 \text{ kg/m}^3$; $C_a = 1484 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,26$	6,6	-	-
Risson <i>et al.</i> (2024)	3,26:1 (agregado:cimento); $a/c = 0,31$; 14,5-16,5% de porosidade	16-19	1,9-2,2	-
Sha <i>et al.</i> (2024)	$C_c = 297-547 \text{ kg/m}^3$; $C_a = 1492 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,29$; 12-27% de porosidade	16,8-24,8	-	-
Castro e Carasek (2025)	$C_c = 431 \text{ kg/m}^3$; $C_a = 1384 \text{ kg/m}^3$; $a/c = 0,3$; 19-23% de porosidade	13,7-17,3	1,9-2,4	-

Fonte: Elaboração própria (2025).

2.4 Métodos de dosagem do concreto permeável

As técnicas de dosagem apresentam grande diversidade entre os estudos publicados, ainda não havendo um parâmetro universalmente estabelecido. Dessa forma, a comunidade científica tem direcionado esforços para desenvolver metodologias de dosagem que possibilitem prever com precisão as características hidráulicas e mecânicas do concreto permeável. Essa variação metodológica acontece devido à ausência de normas e procedimentos técnicos padronizados sobre o assunto.

O ACI PRC-522-23 (2023) aponta que a etapa de concepção das proporções da mistura do concreto permeável costumeiramente envolve trabalhos repetitivos de tentativa e erro. Esse relatório sugere a produção de inúmeros lotes experimentais em laboratório que, sequencialmente, devem ser replicados em campo para verificar se o desempenho esperado será, de fato, alcançado. Em suma, a proposta de metodologia de mistura abordada no relatório, explorada inicialmente por Meininger (1988), tem como meta garantir um equilíbrio entre os vazios, o teor de pasta, a resistência e a trabalhabilidade.

Costa *et al.* (2018) propuseram a utilização do método brasileiro IPT-EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992) para a dosagem de misturas de concreto permeável. Apesar de ter sido originalmente desenvolvido para instituir o consumo de materiais em concretos convencionais, foi observado que o método pode ser aplicado em qualquer tipo de concreto, desde concretos com abatimento zero ou quase nulo até concretos autoadensáveis. O método apresentado por Nguyen *et al.* (2014) parte do

princípio de quantificar o volume de pasta cimentícia essencial para recobrir os agregados, pressupondo que a pasta tem como função somente cobrir e unir as partículas. De modo que, considera-se a inexistência de pasta excedente para efetuar o preenchimento dos vazios entre os grãos. Essa estratégia de dosagem da mistura é fracionada em três fases: determinação do volume de agregados, determinação do volume de pasta de cimento e determinação da relação água/cimento. O método proposto por Perialisi *et al.* (2020) tem como premissa a montagem de um diagrama de desempenho para a dosagem do concreto permeável, o qual busca correlacionar a relação pasta/agregado com algumas das principais propriedades de interesse no estado endurecido: porosidade, permeabilidade e resistência à compressão.

Tang *et al.* (2019) idealizaram uma metodologia de dosagem fundamentada no método estatístico de Taguchi, com base em arranjos ortogonais para otimizar as proporções da mistura. Basicamente, diferentes matrizes cimentícias são examinadas quanto à fluidez e à resistência à compressão, sendo as melhores aplicadas na formulação do concreto permeável, combinadas com diferentes teores de agregados e proporções pasta/agregado. O método almeja relacionar os parâmetros da mistura com o desempenho mecânico e hidráulico, reduzindo o número de misturas experimentais necessárias por meio de uma abordagem estatística estruturada. O estudo elaborado por Zhang *et al.* (2020) para a dosagem do concreto permeável teve como suporte a metodologia de superfície de resposta. Os autores fixaram três parâmetros-chave: espessura ideal da pasta de cimento, espessura real do revestimento e conteúdo total de vazios. Com base nesses parâmetros, geram-se modelos estatísticos preditivos voltados ao aprimoramento da mistura, com o intuito de equilibrar resistência, porosidade e permeabilidade.

2.5 Modelo de empacotamento compressível

O modelo de empacotamento compressível (MEC) foi elaborado por De Larrard (1999) para tratar da resolução do quesito de empacotamento de misturas secas entre todos os componentes usados na dosagem de concreto. O princípio teórico do método baseia-se na interação entre todos os segmentos de tamanho presentes em uma mistura granular, impactando a densidade geral. De acordo com Silva (2004), o MEC como ferramenta para dosagem de concretos, apresenta vantagens nos seguintes aspectos:

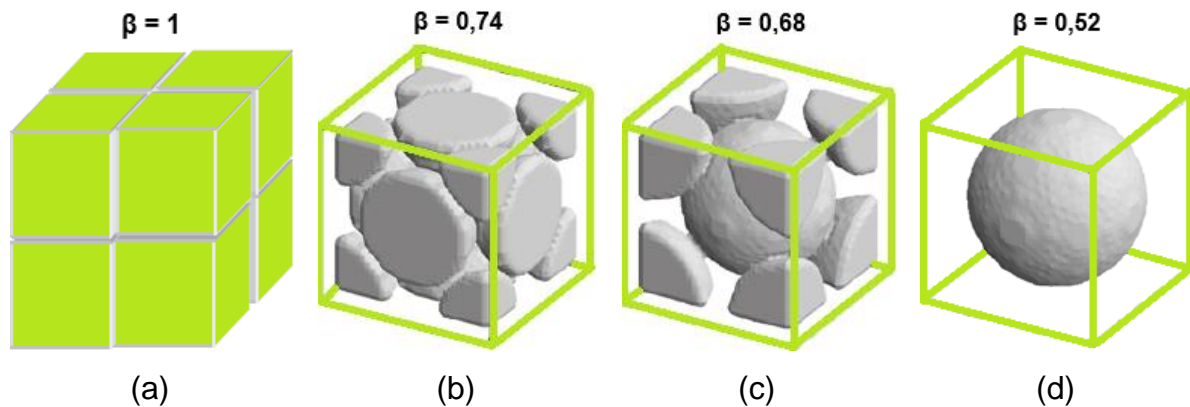
- Seu desenvolvimento segue princípios científicos, ou seja, é embasado na observação de fenômenos, formulação de hipóteses, instituição de modelos matemáticos que expressam os fenômenos e nas comprovações experimentais desses modelos;
- O método inclui a possibilidade de dosar misturas com a contribuição dos novos materiais que atualmente estão sendo empregados na fabricação de concretos, como sílica ativa, cinza volante, fíler calcário, superplastificantes, entre outros;
- Possui capacidade de ser implementado computacionalmente.

Nas subseções a seguir, será exposta uma breve visão geral do modelo, descrevendo sucintamente alguns trechos do livro *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*, publicado por De Larrard em 1999. Os conceitos e formulações do método, que serão descritos, de maneira resumida subsequentemente, podem ser consultados na íntegra na obra referenciada. No tocante à sua aplicação, pretende-se realizar a simulação das dosagens mediante o uso do *software* Bétonlab Pro3, desenvolvido com base na teoria do MEC.

2.5.1 Densidade de empacotamento virtual

A densidade de empacotamento virtual é conceituada como a máxima densidade de empacotamento atingível para uma mistura granular, mantendo o formato original das partículas e organizando-as uma a uma em um volume infinito. Formagini (2005) elucida esse conceito ao ressaltar que elementos cúbicos iguais teriam uma densidade de empacotamento virtual (β) igual a 1 se encaixados face a face (Figura 2.7(a)). Por sua vez, o empacotamento virtual de esferas de tamanho único em um arranjo cúbico de face centrada (CFC), considerado o mais eficiente para esferas idênticas, é 0,74. Mesmo nessa disposição ideal, ainda existem espaços vazios (Figura 2.7(b)). Nesse contexto, se essas mesmas esferas fossem organizadas em um arranjo cúbico de corpo centrado (CCC) ou em um arranjo cúbico simples (CS), os valores seriam 0,68 e 0,52, sequencialmente (Figuras 2.7(c) e 2.7(d)).

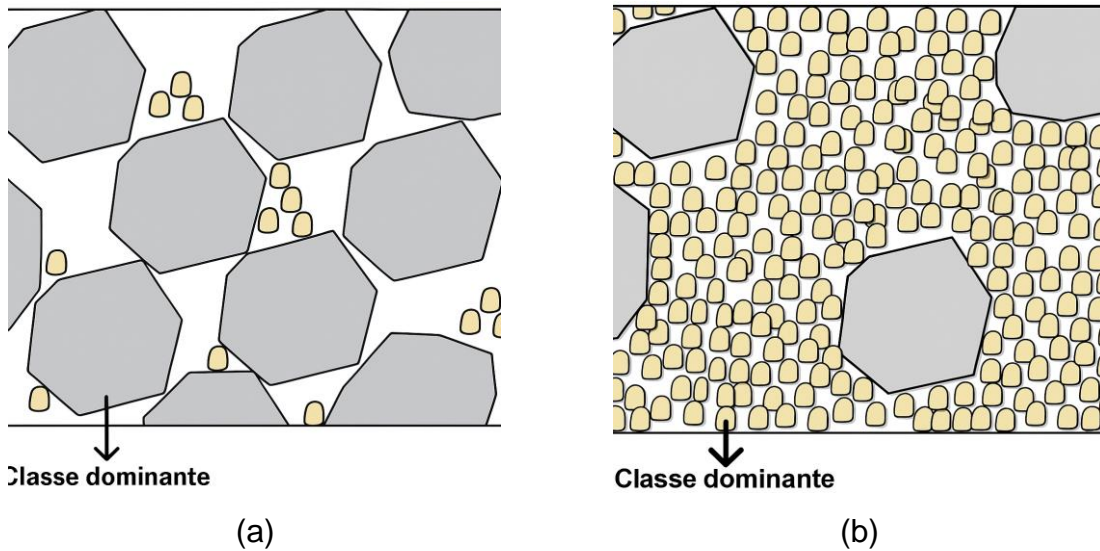
Figura 2.7 – Densidade de empacotamento virtual: (a) cubos, (b) esferas CFC, (c) esferas CCC e (d) esfera CS.



Fonte: Adaptado de Formagini (2005).

Cabe salientar que a densidade de empacotamento virtual é um conceito teórico, utilizado como referência para a melhor disposição das partículas em um sistema ideal. Contudo, na prática, a densidade de empacotamento real depende do grau de compactação imposto nas partículas granulares. Também, em misturas compostas por grãos de diferentes dimensões, estes podem interagir entre si, como no caso dos menores preenchendo os espaços vazios entre os maiores, contribuindo para um acréscimo na densidade final. Porém, esse valor sempre permanecerá abaixo da densidade virtual devido a inevitáveis imperfeições no arranjo. Outro importante aspecto a ser considerado nessa metodologia é o efeito de classe dominante, compreendido como aquela faixa de grãos que assegura a continuidade sólida do corpo granular, evitando a ocorrência de segregação. Sob essa ótica, uma classe de partículas grandes torna-se dominante quando ocupa toda a região disponível, tal que a inserção de partículas menores somente preencha os vazios intersticiais, sem promover o afastamento dos grãos maiores (Figura 2.8(a)). Por outro lado, uma classe de partículas pequenas torna-se dominante quando ocupa mais espaço do que os interstícios existentes entre os grãos grandes (Figura 2.8(b)).

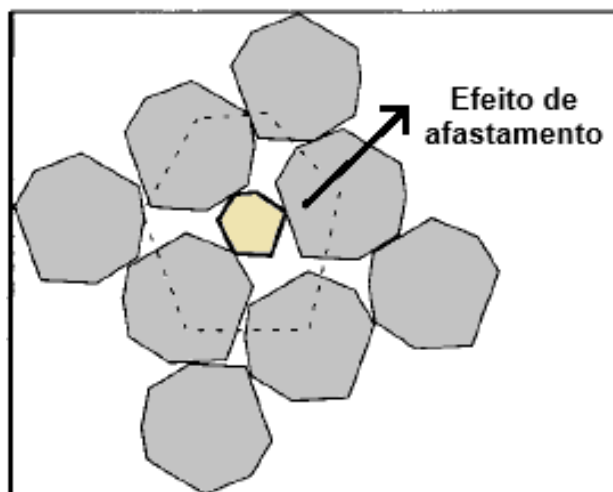
Figura 2.8 – Diferentes classes dominantes em uma mistura binária: (a) partículas grandes dominantes e (b) partículas pequenas dominantes.



Fonte: Adaptado de De Larrard (1999).

Por conseguinte, se supostamente, uma classe de grãos 2 de menor diâmetro for adicionada à porosidade de um empacotamento de grãos graúdos (dominante), e não for mais possível sua acomodação nos vazios, ocorrerá localmente uma redução do volume dos grãos da classe 1 (efeito de afastamento), conforme esboçado na Figura 2.9.

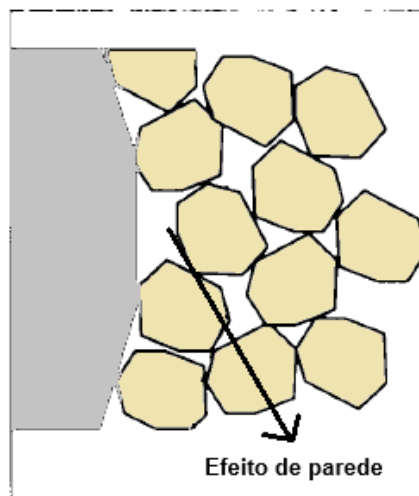
Figura 2.9 – Efeito de afastamento exercido por um grão menor em um empacotamento de grão maior.



Fonte: Adaptado de De Larrard (1999).

Além disso, quando algumas partículas graúdas isoladas estão cobertas por partículas finas (que tem estado de dominância nessa situação), acontece um incremento de vazios no empacotamento das partículas da classe 2, situados nas proximidades da interface de contato. Esse fenômeno físico, imposto pelos grãos maiores sobre os menores, é denominado efeito de parede, como pode ser visualizado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Efeito de parede exercido por um grão maior em um empacotamento de grão menor.



Fonte: Adaptado de De Larrard (1999).

A densidade de empacotamento virtual de uma mistura granular (γ_i) com n classes de grãos, sendo a classe i dominante, é representada pela generalização expressa na Equação 2.1:

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + b_{ij}\beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[1 - \frac{a_{ij}\beta_i}{\beta_j} \right] y_j} \quad (2.1)$$

Onde:

β_i é a densidade de empacotamento virtual da classe dominante;

β_j é a densidade de empacotamento virtual da classe secundária;

y_i é a fração volumétrica da classe de diâmetro i ;

y_j é a fração volumétrica da classe de diâmetro j ;

a_{ij} é um coeficiente relacionado ao efeito de afastamento. Assim sendo, quando o diâmetro i (d_i) \gg diâmetro j (d_j) (sem interação), o coeficiente a_{ij} é igual a 0, enquanto que, quando $d_i = d_j$ (interação total), a_{ij} é igual a 1, ou seja, $0 \leq a_{ij} \leq 1$. A expressão analítica para o parâmetro a_{ij} é (Equação 2.2):

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1,02}} \quad (2.2)$$

b_{ij} é um coeficiente relacionado ao efeito de parede. De forma que, quando $d_i \gg (d_j)$ não há interação na mistura e o coeficiente $b_{ij} = 0$, já quando $d_i = d_j$ acontece interação total e $b_{ij} = 1$, ou seja, $0 \leq b_{ij} \leq 1$. A expressão analítica para o parâmetro b_{ij} é (Equação 2.3):

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^{1,5} \quad (2.3)$$

2.5.2 Abordagem teórica da densidade de empacotamento real

Posteriormente à introdutória sobre a densidade de empacotamento virtual de uma mistura granular, é necessário mensurar a densidade de empacotamento real (\emptyset), que descreve o empacotamento efetivamente obtido em casos práticos. Com a intenção de avaliar a densidade de empacotamento real, é estabelecido um coeficiente escalar K , de acordo com a Equação 2.4, cuja função é relacionar os empacotamentos virtual e real. Esse coeficiente depende do procedimento experimental de compactação exercido nas partículas.

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{\gamma_i}{\beta_i}}{\frac{1}{\emptyset} - \frac{1}{\gamma_i}} \quad (2.4)$$

Onde:

\emptyset é a densidade de empacotamento real ($\emptyset < \gamma$).

Em um cenário de empacotamento monodisperso, que se refere a um arranjo de partículas granulares possuindo todas o mesmo diâmetro, a expressão anterior pode ser simplificada para a Equação 2.5:

$$K = \frac{1}{\frac{\beta}{\phi} - 1} \quad (2.5)$$

Esse coeficiente está diretamente associado ao protocolo experimental de empacotamento, podendo ser definido mediante um teste em laboratório no qual é medida a densidade de empacotamento real de uma mistura granular monodispersa. Considerando uma mistura composta por esferas CFC de mesmo diâmetro, cuja densidade de empacotamento virtual já é conhecida, sendo o valor de $\beta = 0,74$, a Equação 2.5 possibilita encontrar o valor de K correspondente ao processo de compactação aplicado. Certos valores de K foram assumidos por De Larrard (1999) e estão apresentados na Tabela 2.5 abaixo, sob a influência de variados protocolos de empacotamento, salientando-se que, no empacotamento virtual, o valor de K tende ao ∞ .

Tabela 2.5 – Valores de K para variados protocolos de empacotamento.

Protocolo de empacotamento	Coeficiente K
Lançamento simples	4,1
Com uma haste	4,5
Vibração	4,75
Demanda de água	6,7
Vibração + compactação de 10 KPa	9
Empacotamento virtual	∞

Fonte: Adaptado de De Larrard (1999).

Após tratar da metodologia de cálculo do coeficiente K , que relaciona as densidades de empacotamento real e virtual por intermédio dos protocolos de compactação, é pertinente ponderar como as características intrínsecas dos grãos também atuam na obtenção da densidade de empacotamento. Além da consequência direta dos procedimentos experimentais, a densidade de empacotamento virtual em

um sistema monodisperso é amplamente administrada por propriedades como forma, textura superficial e tamanho das partículas, fatores que condicionam a disposição espacial e os vazios intersticiais na configuração final.

2.5.3 Determinação experimental da densidade de empacotamento real

Seguindo a teoria regente do MEC, a determinação experimental da densidade de empacotamento real pode ser executada por uma diversidade de procedimentos, todos caracterizados por um índice de empacotamento. Contudo, experiências prévias demonstraram que técnicas que produzem valores de empacotamento mais elevados (relativos a um alto nível de compactação) são preferíveis, em razão de minimizarem a variabilidade dos resultados.

2.5.3.1 Empacotamento de grãos com dimensões maiores que 100 μm

De Larrard (1999) recomendou a implementação do protocolo de empacotamento que emprega energia de vibração e de compactação combinadas ($K = 9$) em grãos com dimensões maiores que 100 μm , como areia e brita. Nesse caso, um volume padrão de agregado seco é colocado em um cilindro que deve ter um diâmetro superior a cinco vezes o tamanho máximo do agregado. Na sequência, um pistão é inserido no cilindro, aplicando uma pressão de 10 KPa na superfície da amostra. Imediatamente depois, o cilindro é fixado em uma mesa vibratória e submetido à vibração com frequência e tempo pré-determinados. Formagini (2005) esquematizou a configuração do ensaio e a organização do material antes e depois do empacotamento, como ilustrado na Figura 2.11. A densidade de empacotamento real (experimental) (ϕ) para a metodologia descrita é calculada a partir da altura final da amostra, tal como indicado na Equação 2.6:

$$\phi = \frac{4 * M_D}{\pi * D_C^2 * h * \rho_D} \quad (2.6)$$

Onde:

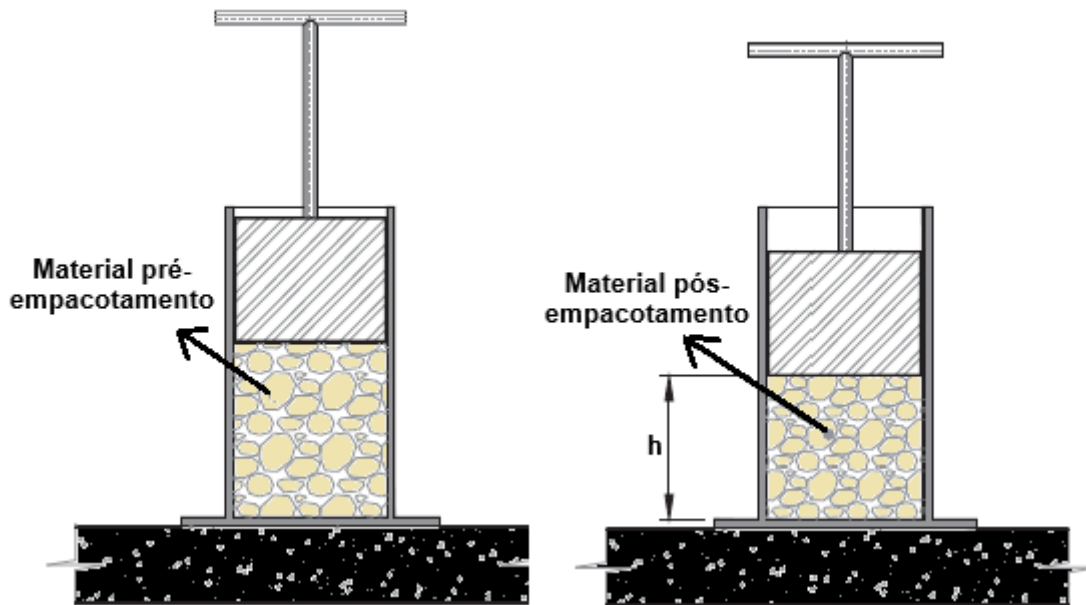
M_D é massa seca do agregado em kg;

D_C é o diâmetro interno do cilindro em m;

h é a altura final da camada do material compactado em m;

ρ_D é a densidade do material em kg/m³.

Figura 2.11 – Configuração de ensaio e organização dos materiais pré e pós-empacotamento.



Fonte: Adaptado de Formagini (2005).

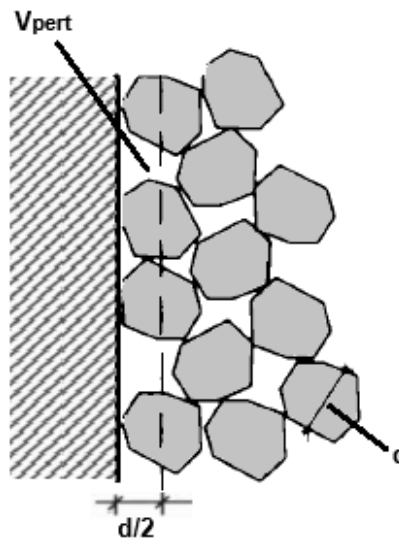
Se tratando da definição da densidade de empacotamento por meio desse teste, é de grande importância controlar a influência do efeito de parede do recipiente cilíndrico sobre as partículas granulares, pois pode gerar uma variação na densidade de empacotamento. Para uma mistura monodispersa, contendo diâmetro d e densidade de empacotamento β , o caminho mais trivial para calcular o aumento de vazios em um recipiente decorrente do contato com uma superfície plana, é assumir que esse efeito é proporcional à superfície do plano e ao tamanho das partículas (CAQUOT, 1937). Ben-Aim (1970) refinou essa abordagem relatando a existência de um volume perturbado dentro do volume unitário total da mistura, englobando a zona entre a parede e uma distância $d/2$ (Figura 2.12). O volume perturbado (V_{pert}) nessa região pode ser alcançado com o suporte da Equação 2.7:

$$V_{pert} = 1 - \left[\left(1 - \frac{d}{h}\right) \left(1 - \frac{d}{D_c}\right)^2 \right] \quad (2.7)$$

Onde:

d é o diâmetro médio do agregado em mm;

Figura 2.12 – Efeito de parede do recipiente cilíndrico sobre os agregados.



Fonte: Adaptado de De Larrard (1999).

Considerando que exista um coeficiente de efeito de parede do recipiente (k_w), neste espaço próximo às paredes do cilindro, deduz-se que o volume médio de empacotamento equivale a $k_w * \beta$, com $k_w < 1$, à medida que no restante do volume assume-se $k_w = 1$. A partir disso, a densidade de empacotamento virtual afetada pelo efeito de parede ($\bar{\beta}$) é dada pela Equação 2.8:

$$\bar{\beta} = [1 - (1 - k_w)V_{pert}]\beta \quad (2.8)$$

Onde:

k_w é o coeficiente de efeito de parede do recipiente, levando em conta a forma dos agregados da mistura, tendo os seguintes valores estabelecidos por De Larrard (1999): 0,88 para grãos arredondados e 0,73 para grãos britados. E, com isso, a densidade de empacotamento real pode então ser calculada usando a Equação 2.4 apresentada anteriormente.

2.5.3.2 Empacotamento de grãos com dimensões menores que 100 μm

Para materiais com partículas possuindo dimensões menores que 100 μm , o ensaio de demanda de água é empregado, apresentando um coeficiente de empacotamento $K = 6,7$, superior a outras técnicas de empacotamento aplicadas em grãos finos. O teste requer a utilização de uma misturadora convencional de argamassa, onde para uma quantidade padronizada de material fino, é definida a dosagem mínima de água necessária para obter uma pasta com consistência espessa e homogênea. Caso o volume de água incorporado for inferior a esse valor mínimo, a mistura não atingirá a consistência desejada, permanecendo somente na forma de um pó umedecido, sem coesão suficiente para a formação de uma pasta. Como diretriz para a implementação do ensaio, utilizando o cimento como exemplo, em primeiro lugar, a água é adicionada na argamassadeira, seguida da adição do cimento. O autor relata que se uma porcentagem de aditivo orgânico for inserida na mistura final, a aferição da demanda de água deve levar isso em consideração, sendo realizada com a mesma proporção de aditivo. Os materiais devem ser misturados em baixa velocidade por um período de um minuto e, após raspagem das laterais do recipiente, são misturados novamente por mais um minuto, desta vez em alta velocidade. Salientando que, o desfecho principal desse teste é o estabelecimento da relação água/cimento crítica (a/c_{crit}). Dessa forma, a densidade de empacotamento real (\emptyset) representa a proporção do volume ocupado pelas partículas granulares em relação ao volume total da mistura (Equação 2.9).

$$\emptyset = \frac{1}{1 + \gamma_c * a/c_{crit}} \quad (2.9)$$

Onde:

γ_c é a densidade do cimento em g/cm^3 ;

a/c_{crit} é a relação água/cimento crítica.

2.5.4 Contribuição dos agregados maiores que 100 µm nas propriedades mecânicas

Além da consistência e espessura da pasta, os agregados influenciam à resistência à compressão consideravelmente, através de sua qualidade de conexão com a pasta de cimento, expressa pelo parâmetro p , e de sua resistência intrínseca, expressa pelo parâmetro q . Essas são constantes empíricas que estão condicionadas ao tipo de agregado. A relação entre a interação da matriz cimentícia com os agregados e a resistência à compressão do concreto (f_c) é dada pela Equação 2.10:

$$f_c(MPa) = \frac{p * f_{cm}}{q * f_{cm} + 1} \quad (2.10)$$

Onde:

p é a qualidade de conexão do agregado com a pasta de cimento;

q é a resistência intrínseca do agregado;

f_{cm} é a resistência à compressão da matriz cimentícia em MPa, obtida de acordo com a expressão a seguir (Equação 2.11):

$$f_{cm}(MPa) = f_{cp} * MPT^{-0,13} \quad (2.11)$$

Sendo f_{cp} correspondente a resistência da pasta de cimento em MPa, relacionada à resistência à compressão do cimento e aos volumes de cimento, água e ar retido. MPT é a espessura máxima da pasta, função do máximo tamanho do agregado e da densidade de empacotamento. Explicações adicionais sobre a obtenção dessas duas variáveis são fornecidas na obra de De Larrard (1999).

Não há um caminho direto para medir os valores de p e q . Visando adquiri-los, é necessário confeccionar ao menos duas misturas de concreto, denominadas 1 e 2, com resistências diferentes, por exemplo, um concreto de resistência normal e outro com proporções adotadas de modo a possuir um desempenho superior, ambos usando um cimento cuja resistência já tenha sido determinada. Além disso, surge a necessidade de ter em posse a densidade de empacotamento dos agregados, medida por meio do ensaio de vibração e compactação especificado no item 2.5.3.1. Uma vez que, com essa informação, é possível determinar a resistência da matriz cimentícia.

Diante disso, depara-se com um sistema de duas equações, apresentando duas incógnitas (p e q), possibilitando seu estabelecimento, via Equação 2.12.

$$\begin{cases} f_{c1}(MPa) = \frac{p * f_{cm1}}{q * f_{cm1} + 1} \\ f_{c2}(MPa) = \frac{p * f_{cm2}}{q * f_{cm2} + 1} \end{cases} \quad (2.12)$$

Quando é possível produzir apenas uma composição de concreto previamente, limitando-se a um único dado de resistência, existe ainda a alternativa de assumir um vínculo entre p e q , caso a resistência intrínseca da rocha (f_{cg}) seja conhecida. A partir de uma aproximação inicial, a correlação entre $\frac{p}{q}$ e f_{cg} pode ser expressa pela Equação 2.13:

$$\frac{p}{q} \approx 2,14 * f_{cg} \quad (2.13)$$

Então, as expressões para p e q são deduzidas (Equações 2.14 e 2.15):

$$p = \frac{1}{f_{cm} * \left(\frac{1}{f_c} - \frac{1}{2,14 * f_{cg}} \right)} \quad (2.14)$$

$$q = \frac{p}{2,14 * f_{cg}} \quad (2.15)$$

Ademais, existe um parâmetro nomeado de coeficiente de resistência à tração (k_t), aplicado para correlacionar a resistência à tração indireta por compressão diametral (f_t) do concreto com sua resistência à compressão. A Equação 2.16 que determina k_t para uma dada classe de agregado, exige o conhecimento de ambas as resistências:

$$k_t = \frac{f_t}{f_c^{0,57}} \quad (2.16)$$

Assim como para as constantes anteriores, quanto mais resultados dessas resistências estiverem à disposição em misturas distintas fabricadas com o mesmo agregado, maior será a precisão das estimativas.

2.6 Compactação do concreto permeável

Embora a dosagem da mistura seja um fator preponderante para o comportamento do concreto permeável, a energia e o método de compactação aplicados influenciam significativamente sua densidade e porosidade e, conseqüentemente, as demais propriedades derivadas de ambas (ANBURUVEL; SUBRAMANIAM, 2023). Seguindo essa linha, Bonicelli, Giustozzi e Crispino (2015) mencionam que o nível de compactação é crucial para alcançar o desempenho desejado do material, devendo ser controlado de forma a equilibrar suas propriedades mecânicas e a capacidade de drenagem. No estudo, foram analisadas três composições sujeitas a diferentes graus de compactação, e observou-se que em todas elas, houve diminuição do conteúdo de vazios e da condutividade hidráulica com o aumento da energia de compactação. Em contrapartida, verificou-se uma elevação nos valores de densidade, resistência à tração indireta, módulo de elasticidade e resistência à abrasão.

A compactação de pavimentos de concreto permeável em campo já é consolidada, sendo realizada com o uso de um rolo na última camada da estrutura (Figura 2.13(a)), tendo em vista que o material possui *slump* próximo de 0. O rolo deve ter largura apropriada para se apoiar nas formas e proporcionar uma força vertical mínima suficiente para o adensamento (ASCE, 2015; ACI PRC-522-23, 2023). Além disso, de acordo com o CT 306 (2024), eventualmente pode-se empregar equipamentos como réguas vibratórias. Entretanto, é necessário tomar cuidado para evitar vibrações demasiadas, que podem resultar no processo de precipitação da pasta para o fundo e obstrução dos poros. Batezini *et al.* (2021) construíram uma calçada experimental consolidada com rolo compactador, conforme ilustrado na Figura 2.13 (b), com a finalidade de executar ensaios de taxa de infiltração de água e testes de deflexão por impacto.

Figura 2.13 – Compactação do concreto permeável com rolo: (a) pavimento e (b) calçada experimental.



(a)



(b)

Fonte: (a) ACI PRC-522-23 (2023) e (b) Batezini *et al.* (2021).

Enquanto, laboratorialmente, não existem normas técnicas específicas para avaliar as propriedades mecânicas do concreto permeável, ou seja, não há protocolos técnicos padronizados para a moldagem e compactação dos corpos de prova em laboratório, que acabam sendo baseados em métodos aplicados ao concreto convencional. Isso pode ser problemático, pelo fato de o concreto permeável apresentar características muito distintas, gerando incertezas quanto à eficácia desses métodos. Uma das questões principais é como replicar, em laboratório, o procedimento de consolidação do material realizado em campo. Então, Singh, Sampath e Biligiri (2020) em um estado de arte, reuniram as técnicas mais recorrentes presentes na literatura, que incluem: pressão pneumática, mesa vibratória, haste de adensamento, martelo Marshall e soquete Proctor. Contudo, ainda é necessário determinar o número ideal de golpes e de camadas para reproduzir valores similares de densidade e porosidade aos do concreto permeável compactado *in situ*, porque esses fatores afetam diretamente suas propriedades físicas, mecânicas e a funcionalidade.

Nesse contexto, alguns estudos têm traçado o comparativo das propriedades de amostras moldadas em laboratório utilizando diferentes mecanismos de compactação. Putman e Neptune (2011) examinaram variadas técnicas de moldagem de espécimes de concreto permeável, priorizando a representatividade das propriedades encontradas em laboratório em relação ao material executado sequencialmente em campo. Os autores verificaram que a aplicação do soquete

Proctor com 10 golpes por camada, em duas camadas, resultou em amostras com densidade e porosidade mais próximas às de testemunhos extraídos de pavimentos permeáveis, apresentando menor variabilidade nos valores e maior consistência no comparativo aos métodos de compactação com haste de adensamento e por queda livre.

Sahdeo *et al.* (2021) conduziram experimentos aplicando diferentes técnicas, incluindo haste de adensamento, vibração, soquete Proctor e martelo Marshall. Os autores concluíram que os melhores resultados de resistência à compressão foram atingidos com o soquete Proctor e o martelo Marshall. Ao passo que, o maior valor de porosidade foi obtido com a haste de adensamento, enquanto o procedimento de vibração não se mostrou satisfatório, visto que resultou na segregação da pasta de cimento na base da amostra. Complementando essas investigações, Risson *et al.* (2024) desenvolveram uma metodologia de moldagem laboratorial direcionada ao controle da densidade do concreto permeável, relacionando distintos teores de compactação quantificados pelo número de golpes com o soquete Proctor. Nesse sentido, constatou-se que a energia empregada influencia fortemente as propriedades hidráulicas e mecânicas, sendo que o incremento no número de golpes promove elevação significativa da densidade do material, originando diminuição da porosidade e aumento da resistência. Através dos resultados experimentais, foi proposto um modelo analítico com ajuste exponencial entre número de golpes e densidade, com condições de orientar a determinação do teor de compactação apropriado conforme os requisitos de desempenho do material.

Na pesquisa de Li *et al.* (2022), avaliou-se o impacto da compactação por mesa vibratória, martelo Marshall e compactação giratória SuperPave sobre as características do material, mantendo constante a dosagem da mistura. Nesse cenário, foi verificado que o método de compactação influenciou diretamente a porosidade, a permeabilidade e a resistência do concreto permeável, sendo a compactação giratória a que apresentou melhor eficiência para balancear o desempenho mecânico e a capacidade drenante. Por outro lado, a mesa vibratória indicou resultados inferiores, atribuídos à baixa densificação dos corpos de prova moldados. Em outro trabalho, Costa *et al.* (2018) efetuaram a comparação entre corpos de prova cilíndricos moldados com o soquete Proctor, compactados em duas camadas com 20 golpes cada, e cilindros extraídos de um bloco de concreto permeável compactado com um rolo em uma única camada. Os resultados

evidenciaram que os corpos de prova confeccionados com o rolo apresentaram resistência à compressão 35% menor. Além disso, foi relatado que as amostras compactadas com o soquete Proctor apresentaram menor dispersão nos valores encontrados e maior facilidade de produção no laboratório.

Chandrappa e Biligiri (2016) mencionam que, apesar do soquete Proctor fornecer maior resistência mecânica e reduzir a dispersão dos resultados em relação a elementos compactados com rolo, ele pode acarretar em uma representação imprecisa do desempenho do material em campo. Isso ocorre visto que a compactação por Proctor pode minimizar o efeito da distribuição vertical da porosidade, suprimindo a formação de uma camada inferior menos densa e mais frágil, comumente presente em pavimentos de concreto permeável, onde a compactação com rolo ocorre somente na superfície superior. Nesse mesmo viés, a NBR 16416 (2015) enfatiza a importância de moldar corpos de prova prismáticos para o ensaio de tração na flexão, parâmetro essencial para estabelecer o tipo de solicitação ao qual o pavimento moldado no local será submetido, com a mesma metodologia que será implementada em campo posteriormente, garantindo a equivalência da densidade em ambas as condições. Desse modo, é possível estimar com maior precisão o comportamento real do material em serviço.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais empregados e os procedimentos experimentais adotados nesta dissertação. Na seção 3.1, estão descritos todos os materiais utilizados ao longo do estudo, independentemente da etapa do experimento em que foram aplicados. Já na seção 3.2, estão explicados os métodos de dosagem, bem como os procedimentos de moldagem, compactação e cura. Além disso, estão descritos os ensaios físicos e mecânicos realizados para a avaliação do desempenho do concreto permeável.

3.1 Materiais

Nesta seção, são apresentados e caracterizados os materiais utilizados ao longo da pesquisa. Dentre eles, incluem-se o cimento Portland CP V-ARI, a brita de origem basáltica, a areia grossa, o aditivo superplastificante, a nanosílica (NS) e a sílica proveniente da queima da casca de arroz (SCA). Cada um desses materiais possui propriedades específicas que influenciam significativamente o desempenho das misturas analisadas, sendo amplamente detalhados nos itens subsequentes.

3.1.1 Agregados

Para a produção do concreto permeável, foi utilizada brita de origem basáltica, adquirida no município de Alegrete/RS. A escolha desse agregado levou em consideração a disponibilidade regional, visto que o transporte de materiais de outras localidades poderia dificultar e onerar o processo. A brita foi caracterizada por intermédio de ensaios padronizados, cujos resultados estão expostos na Tabela 3.1.

O diâmetro máximo característico e o módulo de finura foram determinados em concordância com a norma NBR 17054 (2022), enquanto os ensaios de densidade e absorção de água foram realizados atendendo as recomendações da norma NBR 16917 (2021). As partículas desse agregado possuem diferentes dimensões e formas, como mostrado na Figura 3.1. Em situações de concretagem, a porção do material menor que 2,36 mm foi removida mediante peneiramento, por ser considerada indesejável para essa aplicação.

Tabela 3.1 – Propriedades físicas do agregado graúdo.

Propriedade	Brita de origem basáltica	Norma de referência
Diâmetro máximo característico (mm)	19	NBR 17054 (2022)
Módulo de finura	6,82	
Densidade (g/cm ³)	2,75	NBR 16917 (2021)
Absorção de água (%)	2,12	

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 3.1 – Partículas do agregado graúdo.



Fonte: Elaboração própria (2025).

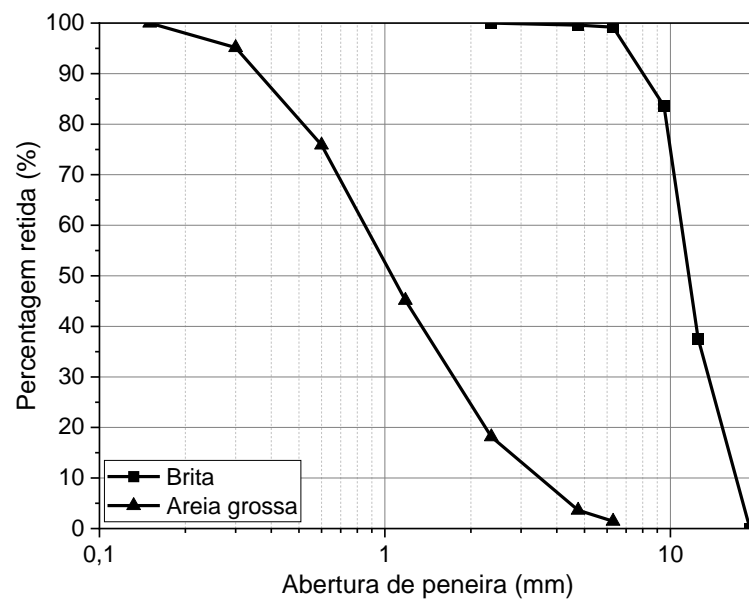
A areia grossa utilizada (Figura 3.2) é oriunda do rio Ibicuí e possui diâmetro máximo característico de 4,75 mm e módulo de finura de 3,37, conforme estabelecido pela norma NBR 17054 (2022). Os ensaios de densidade e absorção de água foram conduzidos seguindo os procedimentos propostos pela norma NBR 16916 (2021), resultando em valores de 2,50 g/cm³ e 1,37%, respectivamente. A Figura 3.3 apresenta as curvas granulométricas de ambos os agregados.

Figura 3.2 – Areia grossa.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 3.3 - Curva granulométrica dos agregados.



Fonte: Elaboração própria (2025).

3.1.2 Aglomerantes

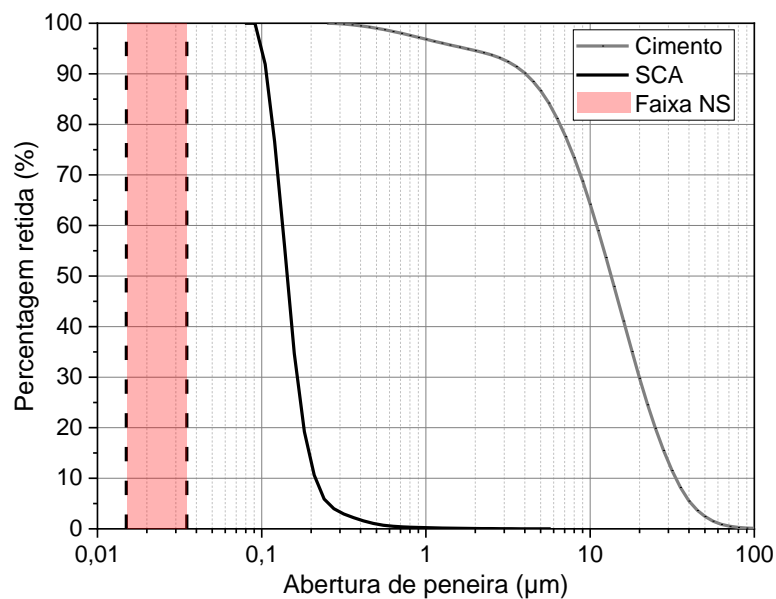
No decorrer da pesquisa, foram empregados como aglomerantes o cimento Portland CP V-ARI, a NS e a SCA. O cimento Portland CP V-ARI, classificado de acordo com os requisitos definidos pela NBR 16697 (2018) e conhecido por proporcionar alta resistência inicial, foi aplicado neste estudo porque possui a menor substituição de clínquer entre os cimentos produzidos no Brasil e é o mais próximo do cimento Portland fabricado internacionalmente. De acordo com os dados fornecidos

pelo fabricante, sua composição inclui de 90% a 100% de clínquer e de 0 a 10% de outros materiais (Itambé, 2024). Sua resistência média à compressão foi medida em três diferentes idades, de acordo com as especificações estabelecidas pela norma NBR 7215 (2019), utilizando uma relação água/aglomerante de 0,48. Os valores encontrados foram 27,1 MPa (3 dias), 33,6 MPa (7 dias) e 39,1 MPa (28 dias).

A NS aplicada foi adquirida da empresa italiana Asltaly S.R.L., sendo amorfa, apresentando densidade de 2,2 g/cm³, pureza de 99,5% e dimensões entre 15 e 35 nm, conforme informado pela própria empresa. Já a SCA utilizada foi fornecida pela empresa Sílica Verde do Arroz Ltda, situada no município de Alegrete/RS. Esse material, abundante na região, é um subproduto do beneficiamento da casca de arroz.

As densidades do cimento Portland CP V-ARI e da SCA foram determinadas seguindo as recomendações da norma NBR 16605 (2017), com valores de 3,01 g/cm³ e 2,1 g/cm³, respectivamente. As granulometrias do cimento e da SCA foram obtidas através do método de difração a laser, utilizando o equipamento Mastersizer 2000, disponível no campus de Uruguaiiana da Universidade Federal do Pampa. A Figura 3.4 ilustra essas curvas, juntamente com a faixa dimensional da NS disponibilizada pelo fabricante.

Figura 3.4 - Curva granulométrica dos aglomerantes.



Fonte: Elaboração própria (2025).

A caracterização química dos três aglomerantes foi realizada por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) com o analisador Epsilon 1, e os resultados estão exibidos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Caracterização química dos aglomerantes.

Componentes químicos	% cimento	% NS	% SCA
Al ₂ O ₃	2,72	1,59	0
SiO ₂	13,73	97,76	94,79
SO ₃	3,55	0,46	0,25
K ₂ O	1,17	0	2,41
CaO	74,71	0,08	1,98
TiO ₂	0	0,03	0
MnO	0	0	0,48
Fe ₂ O ₃	3,74	0,03	0,09
SrO	0,38	0	0

Fonte: Elaboração própria (2025).

3.1.3 Aditivo

Visando otimizar as propriedades do concreto permeável, o aditivo superplastificante foi utilizado na confecção da mistura, com a finalidade de proporcionar uma alta redução na quantidade de água necessária, garantindo boa retenção de trabalhabilidade e maior durabilidade. Este aditivo é composto por policarboxilatos modificados, que atuam como dispersantes para o material aglomerante, com dosagens recomendadas variando de 0,2% a 1,2% da massa dos materiais cimentícios (Master Builders Solutions, 2022). Os ensaios de densidade e teor de sólidos do aditivo foram executados em conformidade com a norma NBR 11768-3 (2019), com os valores obtidos sendo de 1,05 g/cm³ e 28,3%, respectivamente.

3.2 Metodologia

A metodologia deste estudo foi dividida em duas etapas experimentais. Na etapa inicial, replicou-se a mistura de concreto permeável desenvolvida por Costa *et*

al. (2018), avaliando sua performance em função de variações na geometria dos corpos de prova, nos procedimentos de moldagem das amostras e na execução dos ensaios mecânicos, seguindo diferentes normas regulamentadoras. Esta etapa inicial está resumida na subseção 3.2.1 e apresentada integralmente no Apêndice A.

A segunda etapa do experimento constituiu o propósito central da pesquisa, na qual a dosagem do concreto permeável foi executada pelo MEC, com o intuito primordial de aprimorar a resposta estrutural do material. Nesta etapa, foram adotados somente os procedimentos considerados mais práticos e precisos, conforme as definições extraídas nos testes preliminares. Esses procedimentos estão descritos nas subseções a seguir, incluindo a explicação dos processos estabelecidos e dos parâmetros analisados.

3.2.1 Testes preliminares com a mistura de concreto permeável desenvolvida por Costa *et al.* (2018)

Em um primeiro momento, a mistura de concreto permeável originalmente desenvolvida por Costa *et al.* (2018) foi reproduzida, mantendo-se os mesmos materiais constituintes, como o cimento CP V-ARI e o aditivo modificador de reologia. A única exceção realizada foi na escolha do agregado graúdo, substituído por britas provenientes de jazidas localizadas no município de Alegrete/RS. Essa alteração visou adaptar o material estudado exclusivamente ao contexto regional, buscando viabilizar uma eventual produção em maior escala e evitar empecilhos logísticos. Por se tratar de uma composição já conhecida, sua utilização serviu como ponto de partida para o exame das diversas variáveis exploradas.

As análises executadas tiveram como propósito determinar procedimentos metodológicos que favorecessem a praticidade de execução, reduzissem o tempo laboratorial e o consumo de matérias-primas, almejando à máxima otimização dos processos. Sempre que viável, buscou-se o reaproveitamento de um mesmo corpo de prova para diferentes ensaios da campanha experimental. Nesse sentido, foi conduzido um estudo prévio com o intuito de avaliar a influência do processo de obtenção dos espécimes sobre os resultados do ensaio de resistência à compressão axial, comparando amostras cúbicas moldadas diretamente com outras extraídas por corte de corpos prismáticos, bem como com cilindros extraídos de blocos prismáticos.

Desse modo, também foi possível verificar a ocorrência de possíveis variações em função da geometria dos corpos de prova.

Além disso, para o ensaio de resistência à tração na flexão, optou-se por testar ambas as configurações de carregamento, três e quatro pontos. A finalidade foi averiguar se as diferenças nos modos de carregamento resultariam em variações significativas nos valores de resistência e se a instrumentação distinta dos corpos de prova modificaria o comportamento da curva carga vs. deslocamento, originando módulos de elasticidade divergentes.

Na mesma linha, o ensaio de tração indireta foi efetuado em concordância com diferentes normativas, em distintos formatos geométricos de corpos de prova, incluindo cilindros extraídos de blocos, prismas cortados ao meio e cubos extraídos por corte desses corpos prismáticos. As amostras foram carregadas tanto na direção de moldagem e compactação quanto perpendicularmente a ela, permitindo examinar também a influência da orientação do carregamento sobre essa propriedade.

Na sequência, investigou-se o impacto do formato do agregado graúdo na mistura - lamelar ou cúbico - visto que, conforme relatado na literatura, agregados cúbicos geralmente proporcionam melhor desempenho ao concreto. Informações adicionais referentes aos processos de obtenção das amostras, suas dimensões, configurações dos ensaios e normas regulamentadoras utilizadas estão disponíveis no Apêndice A desta dissertação.

Conforme demonstrado e detalhado no Apêndice A, a otimização do procedimento de moldagem para o ensaio de resistência à compressão axial, seguindo as diretrizes da norma UNI EN 12390-3 (2003), consistiu na confecção de cubos moldados diretamente em fôrmas de 150x150x150 mm. Essa escolha proporcionou maior praticidade de execução e menor tempo operacional em laboratório, além da obtenção de resultados menos dispersos, com menores desvios padrão, em comparação aos cilindros extraídos.

O ensaio de resistência a tração na flexão foi conduzido em prismas de 100x100x400 mm, conforme a norma UNI EN 12390-5 (2002), utilizando o método de carregamento em quatro pontos. Essa configuração foi implementada por permitir a instrumentação com medição direta do deslocamento na própria amostra, resultando em uma determinação mais precisa do módulo de elasticidade. As duas seções remanescentes desses elementos prismáticos, originadas após a fratura no ensaio de flexão, foram reutilizadas para a realização do ensaio de tração indireta, em

concordância com os procedimentos estabelecidos pela norma UNI EN 12390-6 (2002).

Além disso, os ensaios de densidade e porosidade das amostras foram efetuados de acordo com a norma ASTM C1754/C1754M (2012), enquanto a taxa de infiltração de água foi avaliada nos cubos moldados anteriormente ao ensaio de compressão axial, com base em uma modificação da norma ASTM C1701/C1701M (2017). A descrição dos testes mencionados é apresentada ao longo desta seção.

3.2.2 Dosagem da mistura pelo modelo de empacotamento compressível

A campanha experimental priorizou essencialmente a adoção de um método de dosagem capaz de promover um avanço significativo na performance mecânica do concreto permeável. A principal meta foi otimizar suas propriedades estruturais, fator importante para expandir suas possibilidades de aplicação, considerando os materiais disponíveis.

O modelo de empacotamento compressível (MEC), proposto por De Larrard (1999), foi empregado para definir a dosagem da mistura. Especificamente, utilizou-se o *software* BétonlabPro 3 para a sua aplicação. Um resumo do método encontra-se na seção 2.4 desta dissertação. Os ingredientes da mistura foram dosados para atingir uma porosidade de projeto de 20% e a máxima resistência à compressão possível com os materiais disponíveis. Agregado miúdo pode ser adicionado à mistura de forma limitada para aumentar a resistência mecânica, considerando que um excesso pode comprometer a infiltração de água no concreto permeável. A adição controlada de até 20% de areia grossa no concreto permeável pode desenvolver uma mistura otimizada, melhorando seus atributos mecânicos sem comprometer os requisitos básicos de permeabilidade (Ali e Rashid, 2024; Nazeer, Kapoor, Singh, 2022). Dessa maneira, fixou-se um limite máximo de 20% de areia para garantir um equilíbrio entre resistência e propriedades permeáveis.

Nesta etapa, foram utilizados agregado graúdo de origem basáltica, areia grossa, cimento Portland CP V-ARI e o aditivo superplastificante. Para determinar a mistura desejada, foi necessário carregar algumas propriedades dos materiais constituintes do concreto permeável no *software* BétonlabPro 3, as quais são descritas no item a seguir.

3.2.2.1 Parâmetros necessários para inserir os materiais no BétonlabPro 3

O processo de definição da mistura começa com o cimento, com as propriedades apresentadas na Tabela 3.3 sendo obrigatórias para o registro do ligante.

Tabela 3.3 – Parâmetros necessários para o registro do cimento.

Material	Parâmetros necessários
Cimento	Densidade
	Granulometria
	Composição do cimento
	Resistência à compressão em três idades (mínimo)

Fonte: Elaboração própria (2025).

A densidade, a granulometria, a composição e a resistência à compressão média estão apresentadas na subseção 3.1.2. Além desses parâmetros, o *software* também solicita a composição de Bogue do cimento. Porém, ao adicionar uma ampla faixa de valores para esse parâmetro, verificou-se que não houve modificação no valor final da resistência à compressão do concreto. Com base nisso, permitiu-se adotar valores presentes na literatura, usando como referência o estudo de Shanahan e Zayed (2007), que efetuou os cálculos de Bogue para quatro tipos de cimento.

Por sua vez, a Tabela 3.4 apresenta as propriedades dos agregados necessárias para o carregamento no *software* BétonlabPro 3.

Tabela 3.4 – Parâmetros necessários para o registro dos agregados.

Material	Parâmetros necessários
Agregados	Densidade
	Absorção de água
	Granulometria
	Densidade de empacotamento
	p e q

Fonte: Elaboração própria (2025).

A densidade, a absorção de água e a composição granulométrica da pedra britada e da areia estão descritas na subseção 3.1.1.

Para obter a densidade de empacotamento do agregado graúdo, a composição granulométrica foi dividida em três intervalos principais (19-12,5 mm, 12,5-9,5 mm e 9,5-2,36 mm), nos quais a densidade de empacotamento foi medida, seguindo os procedimentos estabelecidos por De Larrard (1999). A divisão nessas três frações foi adotada porque possuem teores representativos e aproximadamente similares, permitindo uma caracterização satisfatória dessa propriedade. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.5. Esse ensaio consistiu na inserção de uma quantidade padronizada de material em um cilindro com diâmetro de 160 mm, seguido da aplicação de uma pressão constante, por meio de um pistão com peso aproximado de 200 N, combinada com um efeito vibratório por três minutos. Com o auxílio de um paquímetro, foram necessárias medições da altura da camada de material antes e depois da compactação. A Figura 3.5 mostra o equipamento de ensaio e a execução do procedimento.

Tabela 3.5 – Densidade de empacotamento para os três intervalos granulométricos do agregado graúdo.

Faixa granulométrica (mm)	Densidade de empacotamento, média
19-12,5	0,616
12,5-9,5	0,612
9,5-2,36	0,632

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 3.5 - Ensaio de densidade de empacotamento no agregado graúdo.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Assim como no procedimento descrito acima, o ensaio de densidade de empacotamento da areia foi realizado nas frações de 6,3-2,36 mm, 2,36-0,6 mm e 0,6-0,15 mm. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.6, e a Figura 3.6 ilustra a execução do procedimento laboratorial.

Tabela 3.6 – Densidade de empacotamento para os três intervalos granulométricos da areia.

Faixa granulométrica (mm)	Densidade de empacotamento, média
6,3-2,36	0,687
2,36-0,6	0,707
0,6-0,15	0,718

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 3.6 - Ensaio de densidade de empacotamento na areia.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Para calibrar os parâmetros p e q , foi necessário preparar duas misturas de concreto permeável previamente e medir seus valores de resistência à compressão (UNI EN 12390-3, 2003) em pelo menos três diferentes idades (3, 7 e 28 dias), além da porosidade obtida em laboratório, conforme a norma ASTM C1754/C1754M (2012).

Diante disso, foi examinada a composição estudada por Costa *et al.* (2018), mantendo a proporção de 4:1 (agregado:cimento), a relação água/cimento de 0,26 e a porosidade-alvo de 25%, utilizando o mesmo agregado gráudo considerado para o estudo, visando permitir sua aplicação no método de dosagem proposto. Adicionalmente, elaborou-se uma mistura alternativa com maior consumo de cimento,

na qual a proporção agregado:cimento foi ajustada para 3:1, permanecendo-se a relação água/cimento e a porosidade-alvo inalteradas. Os valores de resistência encontrados para as duas misturas estão apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Resultados de resistência à compressão axial para as duas misturas prévias de concreto permeável com agregado graúdo utilizado.

Mistura	Resistência à compressão (MPa)			Porosidade (%)
	3 dias	7 dias	28 dias	
4:1	3,57	4,42	5,58	26,67
3:1	4,91	5,00	6,69	25,17

Fonte: Elaboração própria (2025).

Com a incorporação desses dados na seção de calibração dos agregados, selecionada na coluna de constituintes do *software* BétonlabPro 3, os parâmetros p e q para a pedra britada foram 0,1692 e 0,00103, respectivamente.

O mesmo procedimento foi seguido para calibrar os parâmetros p e q da areia, desta vez utilizando uma mistura de concreto autoadensável desenvolvida pelo grupo de pesquisa Modelagem e Análise Experimental de Compósitos (MAEC), de acordo com o estudo conduzido por Meichtry *et al.* (2024). Assim, os valores obtidos foram $p = 0,68$ e $q = 0,001$.

3.2.2.2 Composição da mistura resultante e avaliação dos efeitos da adição de NS e SCA no concreto permeável

Incluindo todos esses parâmetros de material e levando em conta as condições de uma porosidade projetada de 20%, um máximo de 20% de areia e a solicitação da máxima resistência à compressão possível com os materiais disponíveis, o *software* foi executado. A mistura obtida apresentou uma proporção de agregado graúdo/areia/cimento de 2,68:0,62:1 (80% de agregado graúdo e 20% de areia), uma relação água/cimento de 0,24 e uma relação superplastificante/cimento de 0,005. Mais precisamente, para cada m³ da mistura, são utilizados 456,6 kg de cimento, 1224,1 kg de agregado graúdo, 282,1 kg de areia e 109,3 kg de água (ou seja, a densidade projetada é de 2072,1 kg/m³). Com essas proporções da mistura, o *software* BétonlabPro 3 prevê uma resistência à compressão axial de 14,1 MPa, uma

resistência à tração indireta de 2,5 MPa e um módulo de elasticidade de 15,5 GPa aos 28 dias de idade.

Uma vez que a mistura de referência, modelada com desempenho satisfatório, pôde ser estabelecida, resolveu-se avaliar os efeitos da adição de NS e SCA no concreto permeável. Ambas as misturas mantêm as mesmas proporções do concreto de referência, dosado com o BétonlabPro 3 (proporção agregado graúdo/areia/cimento de 2,68:0,62:1; relação água/cimento de 0,24) e recebem o acréscimo de 3% de material silicoso em relação à massa de cimento. De forma mais exata, para cada m³ da mistura, são empregados 456,6 kg de cimento, 1224,1 kg de agregado graúdo, 282,1 kg de areia, 109,3 kg de água e 13,7 kg de material silicoso. A relação superplastificante/cimento foi aumentada para 0,01 visando preservar adequadamente a trabalhabilidade na mistura com adição de NS, conforme explicado na próxima subseção. Já na mistura contendo SCA, não foi verificada a necessidade de ajuste no teor de aditivo.

3.2.3 Procedimento de mistura com e sem adição de material silicoso

A etapa de produção do concreto permeável foi realizada na Universidade Federal do Pampa/Campus Alegrete, em uma betoneira convencional com eixo inclinado. O protocolo de mistura adotado difere do processo usualmente empregado em concretos convencionais. Assim, todo o agregado foi adicionado primeiro à betoneira. Na sequência, uma pequena quantidade de água (aproximadamente 10%) foi adicionada à mistura para umedecer a superfície do agregado e facilitar a adesão da pasta de cimento, evitando que ela se depositasse na parede da betoneira. O agregado foi misturado por cerca de 30 segundos até que a pequena quantidade de água adicionada umedecesse sua superfície. Em seguida, todo o ligante foi colocado na betoneira, que permaneceu em funcionamento enquanto a água restante era adicionada gradualmente à mistura. Por fim, o aditivo foi introduzido na betoneira. Após a inserção de todos os materiais, a betoneira permaneceu em operação por aproximadamente 5 minutos, até que uma mistura homogênea fosse obtida.

Como diferença chave, na mistura contendo 3% de NS em relação à massa de cimento, a NS foi preliminarmente incorporada a cerca de 50% do total de água da mistura e submetida a intensa agitação para garantir sua dispersão uniforme,

utilizando um misturador de tinta por 5 minutos. Essa solução foi então adicionada gradualmente a betoneira antes da introdução do restante da água.

Em virtude de metade da água da mistura ter sido aplicada na dispersão da NS, devido à sua forte tendência à aglomeração, a quantidade de aditivo foi dobrada em comparação à mistura de controle durante a moldagem. No entanto, uma dosagem ainda maior teria sido necessária, mas decidiu-se não exceder o limite recomendado pelo fabricante, a fim de evitar possíveis problemas relacionados ao uso excessivo do aditivo (0,2% a 1,2% em massa de cimento).

3.2.4 Moldagem, compactação e cura das amostras

Com a porosidade de projeto definida e, conseqüentemente, a densidade de projeto, é possível calcular a massa da amostra, uma vez que o volume tenha sido fixado. Uma forma de controlar a densidade dos corpos de prova durante o processo de moldagem é inserir a massa previamente calculada no molde. Assim, por exemplo, para um corpo de prova prismático com dimensões de 100×100×400 mm, considerando a densidade de projeto calculada anteriormente para a mistura de referência, a massa correspondente é igual a 8,29 kg.

O processo de moldagem teve início com a pesagem do molde em uma balança digital (capacidade máxima de 150 kg e precisão de 50 g) para mensurar sua tara. Em seguida, o molde foi preenchido com a mistura, que foi compactada com um rolo de concreto de 300 mm de diâmetro, 350 mm de comprimento e peso de 57,4 kg. A compactação foi realizada em uma única camada, simulando a técnica *in situ* utilizada em pavimentos permeáveis. Essa decisão foi tomada porque a norma NBR 16416 (2015) regulamenta que o adensamento do concreto no molde deve reproduzir as condições de campo, visando obter em laboratório densidades semelhantes às alcançadas na prática. Finalmente, o molde foi pesado para verificar se a massa real corresponde à projetada. Caso a massa real fosse inferior à massa de projeto, mais material era adicionado e compactado novamente até que o valor de projeto fosse atingido, com uma tolerância de 50 g. A Figura 3.7 mostra esse procedimento para a moldagem de corpos de prova prismáticos. Os corpos de prova foram armazenados em uma câmara úmida com temperatura controlada de 23 °C e umidade relativa de 99%. A desmoldagem ocorreu após 72 horas, e as amostras foram curadas na câmara úmida mencionada por um período de 28 dias.

Figura 3.7 - Procedimento de moldagem do concreto permeável utilizado nesta pesquisa: (a) peso do molde vazio, (b) molde preenchido e compactado, (c) molde pesado para verificação da massa, (d) adição de mais concreto e nova compactação e (e) obtenção do valor de massa de projeto.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Dois tipos de corpos de prova foram moldados:

- Cúbicos de 150x150x150 mm, para execução dos testes de taxa de infiltração de água e compressão axial (Figura 3.8(a));
- Prismáticos de 100x100x400 mm, destinados aos testes de tração na flexão e tração indireta (Figura 3.8(b)).

Figura 3.8 – Corpos de prova confeccionados a partir da dosagem com o MEC: (a) cubos de 150x150x150 mm e (b) prismas de 100x100x400 mm.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2025).

3.2.5 Caracterização física do concreto permeável

A densidade do concreto endurecido e a porosidade dos corpos de prova foram calculadas conforme a norma ASTM C1754/C1754M (2012). O procedimento foi realizado aos 21 dias de idade. As massas das amostras foram medidas em condição seca (Figura 3.9(a)), sendo submetidas a uma temperatura de 38°C por 24 horas até atingirem constância de massa. A densidade (D) foi estipulada pela divisão da massa seca dos corpos de prova (M_d) pelo seu volume real (V), obtido a partir de suas dimensões medidas com um paquímetro. Após a medição das massas secas, as amostras foram submersas em um banho maria por 30 minutos. As massas submersas (M_s) foram mensuradas com uma balança hidrostática (Figura 3.9(b)). A porosidade (P) foi então calculada de acordo com a Equação 3.1.

$$P (\%) = \left[1 - \left(\frac{M_d - M_s}{\rho_w \times V} \right) \right] \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

M_d é a massa seca dos corpos de prova em g;

M_s é a massa submersa dos corpos de prova em g;

ρ_w é a densidade da água em g/cm³;

V é o volume do corpo de prova em cm³.

Figura 3.9 – Ensaio de densidade e porosidade: (a) massas das amostras em condição seca e (b) massas submersas.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2025).

A taxa de infiltração foi determinada a partir de uma modificação da norma ASTM C1701/C1701M (2017), baseada nas ideias apresentadas por AlShareedah *et al.* (2019), Lederle, Shepard e Meza (2020), Strieder *et al.* (2022) e Ali e Rashid (2024). A adaptação foi necessária para viabilizar sua aplicação em elementos de menor dimensão, pois na testagem preliminar, o ensaio foi realizado em blocos de 400x400x200 mm. Contudo, a moldagem e a compactação dessas estruturas se mostraram mais exaustivas em razão da sua maior altura, dificultando a transmissão da energia de compactação do rolo até as camadas inferiores. Além disso, o peso elevado, certamente ultrapassando 60 kg, complicava o manuseio durante as medições. Dessa forma, optou-se por executar o ensaio nos cubos de 150x150x150 mm produzidos.

O ensaio foi efetuado aos 7 dias de idade, usando um anel de infiltração plástico com 75 mm de diâmetro, posicionado na região central do corpo de prova, com sua extremidade inferior fixada à superfície do elemento com massa de calafetar (Figura 3.10(a)). Em seguida, foi realizado um teste de pré-molhagem com 0,9 kg de água, mantendo-se uma coluna d'água padrão entre duas linhas marcadas no interior do anel (10 e 15 mm) (Figura 3.10(b)). A mensuração do tempo teve início quando a água atingiu a superfície do cubo e terminou quando desapareceu completamente da superfície do concreto permeável. Essa contagem de tempo serviu para definir a quantidade de água aplicada no ensaio. Se o tempo de pré-molhagem fosse inferior a 30 segundos, utilizava-se 4,5 kg de água no ensaio. Caso contrário, continuava-se usando a porção de 0,9 kg. O teste foi realizado três vezes em cada amostra cúbica para coletar um tempo médio para estabelecer a taxa de infiltração. A taxa de infiltração (I) é calculada aplicando a Equação 3.2:

$$I \text{ (mm/h)} = \frac{K \times M}{D^2 \times t} \quad (3.2)$$

Onde:

K é o fator necessário para converter os dados medidos para a unidade do SI.
O valor de K é 4583666000;

M é a massa de água infiltrada em kg;

D é o diâmetro da área de infiltração em mm;

t é o tempo medido relacionado à infiltração da água em s.

Figura 3.10 – Ensaio de taxa de infiltração de água: (a) anel de infiltração plástico posicionado na área central do cubo e (b) água adicionada ao anel durante o ensaio.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2025).

3.2.6 Caracterização mecânica do concreto permeável

Nesta seção, são apresentados os métodos experimentais empregados para a obtenção das propriedades mecânicas do concreto permeável, englobando resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão em quatro pontos, resistência à tração indireta e módulo de elasticidade.

3.2.6.1 Ensaio de resistência à tração na flexão em quatro pontos

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados de acordo com a norma europeia UNI EN 12390-5 (2002). No ensaio de flexão em quatro pontos, as vigas foram submetidas a cargas concentradas em dois pontos ao longo do vão, garantindo que o terço central da amostra estivesse exposto a uma tensão de flexão pura (Figura 3.11(a)). Os testes foram realizados nos corpos de prova prismáticos de 100x100x400 mm, de acordo com a recomendação da norma, e conduzidos aos 28 dias de idade. Para determinar o módulo de flexão em quatro pontos como medida de rigidez, as vigas foram instrumentadas com um yoke e um LVDT posicionado no centro do vão, como mostrado na Figura 3.11(b). Nessa condição, para o cálculo do módulo de elasticidade ($E_{flexão, 4 pontos}$) (Equação 3.3), uma linha é ajustada à curva carga-deflexão na região linear das amostras.

$$E_{flexão, 4 pontos} = \frac{23Fl^3}{108fbh^3} \quad (3.3)$$

Onde:

F é o carregamento máximo na região linear-elástica em N;

l é o comprimento do vão em mm;

f é a deflexão medida no ponto médio do vão em mm;

b é a largura da seção transversal em mm;

h é a altura da seção transversal em mm.

O ensaio de flexão foi realizado na máquina de ensaios universal EMIC GR048, com uma célula de carga de 200 kN, aplicando um deslocamento controlado de 0,1 mm/min. O ensaio foi filmado com uma câmera de 30 quadros por segundo para posterior análise de correlação de imagens utilizando o *software* GOM (GOM GmbH, 2019). É interessante destacar que, devido à superfície naturalmente irregular apresentada pelo concreto permeável, não foi necessária nenhuma preparação da superfície (pintura branca e tinta spray preta) para obter uma imagem adequada para a análise digital. Durante o ensaio, os corpos de prova foram carregados seguindo a direção de moldagem e adensamento. A resistência à tração na flexão em quatro pontos ($f_{TF, 4 pontos}$) é calculada a partir da Equação 3.4:

$$f_{TF, 4 pontos}(MPa) = \frac{Fl}{bh^2} \quad (3.4)$$

Figura 3.11 – Ensaio de tração na flexão em quatro pontos: (a) configuração do carregamento e (b) instrumentação do corpo de prova.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2025).

3.2.6.2 Ensaio de resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi conduzido nas amostras cúbicas de 150x150x150 mm, adotando os procedimentos relatados na norma europeia UNI EN 12390-3 (2003), que permite essa geometria em suas diretrizes. Foi utilizada uma máquina de ensaios universal INSTRON SATEC™ 5590-HVL, equipada com uma célula de carga de 1500 kN e controlada a uma taxa de deslocamento de 0,5 mm/min. Os corpos de prova no ensaio de compressão foram carregados seguindo a direção de moldagem e compactação, aos 28 dias de idade. O teste também foi filmado com uma câmera de 30 quadros por segundo para posterior análise de correlação de imagens, utilizando o *software* GOM (GOM GmbH, 2019). A Figura 3.12 ilustra a execução do ensaio de resistência à compressão axial nos espécimes cúbicos.

Figura 3.12 – Ensaio de resistência à compressão axial.



Fonte: Elaboração própria (2025).

3.2.6.3 Ensaio de resistência à tração indireta

O ensaio de tração indireta foi realizado em corpos de prova prismáticos reaproveitados após a ruptura no ensaio de tração na flexão em quatro pontos. Como a maioria das fraturas ocorreu próxima ao centro do prisma, cada elemento pôde ser dividido em duas seções reutilizáveis. A aplicação da carga foi conduzida de forma linear ao longo do comprimento da amostra, utilizando-se duas tiras de madeira (amostra/suporte), com a finalidade de transferir e acomodar as cargas, conforme mostrado na Figura 3.13. Os procedimentos de ensaio foram adotados em concordância com as recomendações da norma UNI EN 12390-6 (2002), após 28 dias de cura. Os ensaios foram executados em uma máquina de ensaios universal

INSTRON SATEC™ 5590-HVL, equipada com uma célula de carga de 1500 kN. Os corpos de prova foram submetidos ao carregamento seguindo a direção de moldagem e adensamento. A resistência à tração indireta (f_{TI}) foi encontrada utilizando a Equação 3.5, descrita abaixo:

$$f_{TI} \text{ (MPa)} = \frac{2F}{\pi ld} \quad (3.5)$$

Onde:

F é o carregamento máximo em N;

l é o comprimento da linha de contato do corpo de prova em mm;

d é a dimensão da seção transversal do corpo de prova em mm.

Figura 3.13 – Ensaio de resistência à tração indireta.



Fonte: Elaboração própria (2025).

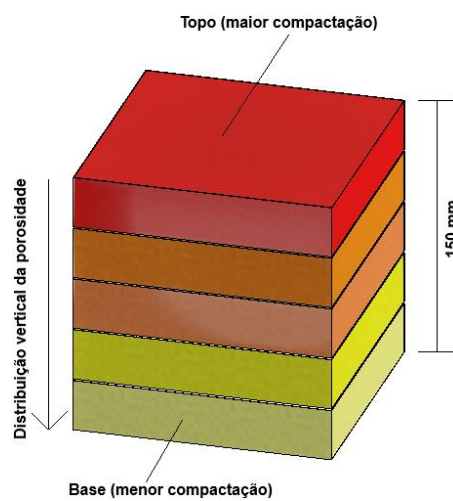
3.2.7 Efeito de distribuição vertical da densidade e porosidade

A investigação do efeito da distribuição vertical da densidade e porosidade foi inspirada na pesquisa de Rao *et al.* (2020), que analisou a variação da porosidade e, por conseguinte, da densidade ao longo da altura de corpos de prova. No experimento, os autores utilizaram uma mistura compactada estaticamente apenas na camada superior de uma estrutura com 120 mm de altura e avaliaram o fenômeno cortando-se seis seções horizontais, cada uma com 20 mm de espessura, do corpo de prova.

Seguindo essa abordagem, um bloco de 150 mm de altura e outro de 100 mm foram seccionados, e a densidade e porosidade de cada fatia extraída foram medidas da mesma forma explicada anteriormente. Cabe salientar que foi difícil obter fatias de

tamanhos equivalentes, devido à complexidade de realizar cortes precisos com a serra diamantada, especialmente em espessuras reduzidas. A Figura 3.14 ilustra a esquematização da distribuição vertical da porosidade ao longo do bloco, bem como as fatias seccionadas nas amostras reais, referentes aos blocos de 150 mm e 100 mm de altura.

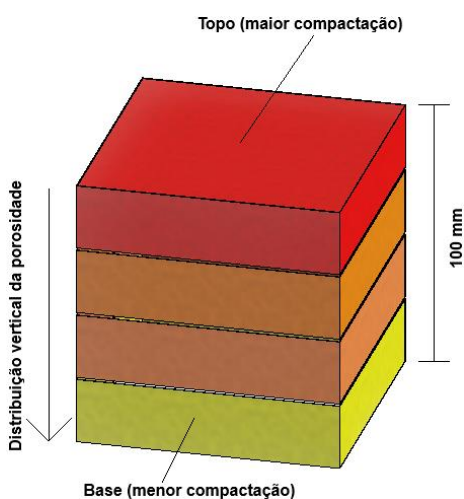
Figura 3.14 – Distribuição vertical da porosidade: (a) esquematização do bloco de 150 mm, (b) fatias do bloco de 150 mm, (c) esquematização do bloco de 100 mm e (d) fatias do bloco de 100 mm.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaboração própria (2025).

3.2.8 Simulações de misturas por meio do *software* BétonlabPro 3

Como a mistura otimizada fornecida pelo *software* BétonlabPro 3, com base nas condições e restrições inicialmente estabelecidas, apresentou valores experimentais muito próximos daqueles previstos teoricamente pela metodologia do MEC, tornou-se possível a realização de simulações complementares. O intuito dessas investigações adicionais foi analisar distintos cenários com potencial para aprimorar o desempenho mecânico do concreto permeável ou ampliar as alternativas de formulação da mistura, dispensando processos repetitivos de tentativa e erro, ou seja, resultando em uso racional das matérias-primas, com economia de tempo e custos.

Uma das simulações consistiu em manter todos os parâmetros da mistura de referência, alterando apenas o agregado graúdo com 19 mm de diâmetro máximo por outro com 9,5 mm, mais apropriado em dimensões para aplicação no concreto permeável, segundo a literatura. Outra hipótese avaliou a influência do teor de areia, liberando a limitação de 20% imposta anteriormente, desde que mantida a porosidade projetada de 20%. Ademais, também foram testados diferentes teores de substituição de cimento por SCA, buscando identificar o índice ideal para maximizar a resistência, bem como o limite de substituição que ainda mantivesse o desempenho da mistura de referência.

Além dessas simulações, também foram examinados dois panoramas com enfoque em desempenho-limite: o primeiro caso buscou identificar o menor consumo de cimento necessário para atingir a resistência à tração mínima de 2 MPa, respeitando a exigência da norma NBR 16416 (2015); o segundo manteve essa mesma lógica, porém com a redução da porosidade para o limite mínimo de 15%. Em ambos os cenários, foi mantido o teor máximo de 20% de areia em relação à composição total dos agregados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, estão apresentados os dados obtidos no decorrer da pesquisa, juntamente com suas respectivas análises e interpretações, a qual avaliou a adoção do MEC com a finalidade de alcançar um progresso expressivo no desempenho mecânico do concreto permeável. Com a dosagem estabelecida, foram conduzidos ensaios nas amostras produzidas a partir das definições retiradas dos testes preliminares, abrangendo densidade no estado endurecido, porosidade, taxa de infiltração modificada, resistência à compressão axial, tração na flexão em quatro pontos e tração indireta.

4.1 Densidade no estado endurecido e porosidade do concreto permeável

A Tabela 4.1 apresenta os valores médios de densidade no estado endurecido e porosidade, acompanhados do desvio padrão, para cada tipo de corpo de prova analisado nesta etapa experimental. Também são indicados os erros relativos às densidades teóricas de projeto, que correspondem a 2072,1 kg/m³ para a mistura de referência e a 2085,8 kg/m³ para as misturas com 3% de materiais silicosos, bem como à porosidade-alvo, para efeito comparativo. No tocante a essa diferença percentual entre os valores reais obtidos no laboratório e os teóricos, o erro cometido com o MEC foi minimizado, sendo, por exemplo, bem inferior à variação exibida durante a aplicação da metodologia do IBRACON (CT 306, 2024) (ver Apêndice A – A.2.1). Isso indica uma forma eficiente de projetar e controlar essas propriedades físicas, fundamentais para a atuação do concreto permeável.

Os gráficos da Figura 4.1 ilustram a relação entre essas propriedades para a mistura de referência e para as misturas com adição de NS e de SCA. Para a porosidade-alvo de 20%, a equação da reta ajustada aos resultados da mistura de referência indica uma densidade de 2077,7 kg/m³, com uma diferença de +0,3% em relação ao valor projetado. Para a mistura com adição de NS, essa densidade foi de 2060,4 kg/m³, exibindo uma variação de -1,2%, enquanto, para a mistura com adição de SCA, o valor de densidade foi igual a 2077,2 kg/m³, com uma oscilação de -0,4%. Adicionalmente, a totalidade dos valores de porosidade obtidos experimentalmente permaneceram muito próximos de 20%, que é considerado o índice ideal para equilibrar os requisitos de resistência mecânica e as necessidades de manejo das

águas pluviais, segundo Wang *et al.* (2019). Essa gama de valores de porosidade também está de acordo com o intervalo recomendado pelo ACI PRC-522-23 (2023), que varia entre 15% e 35%.

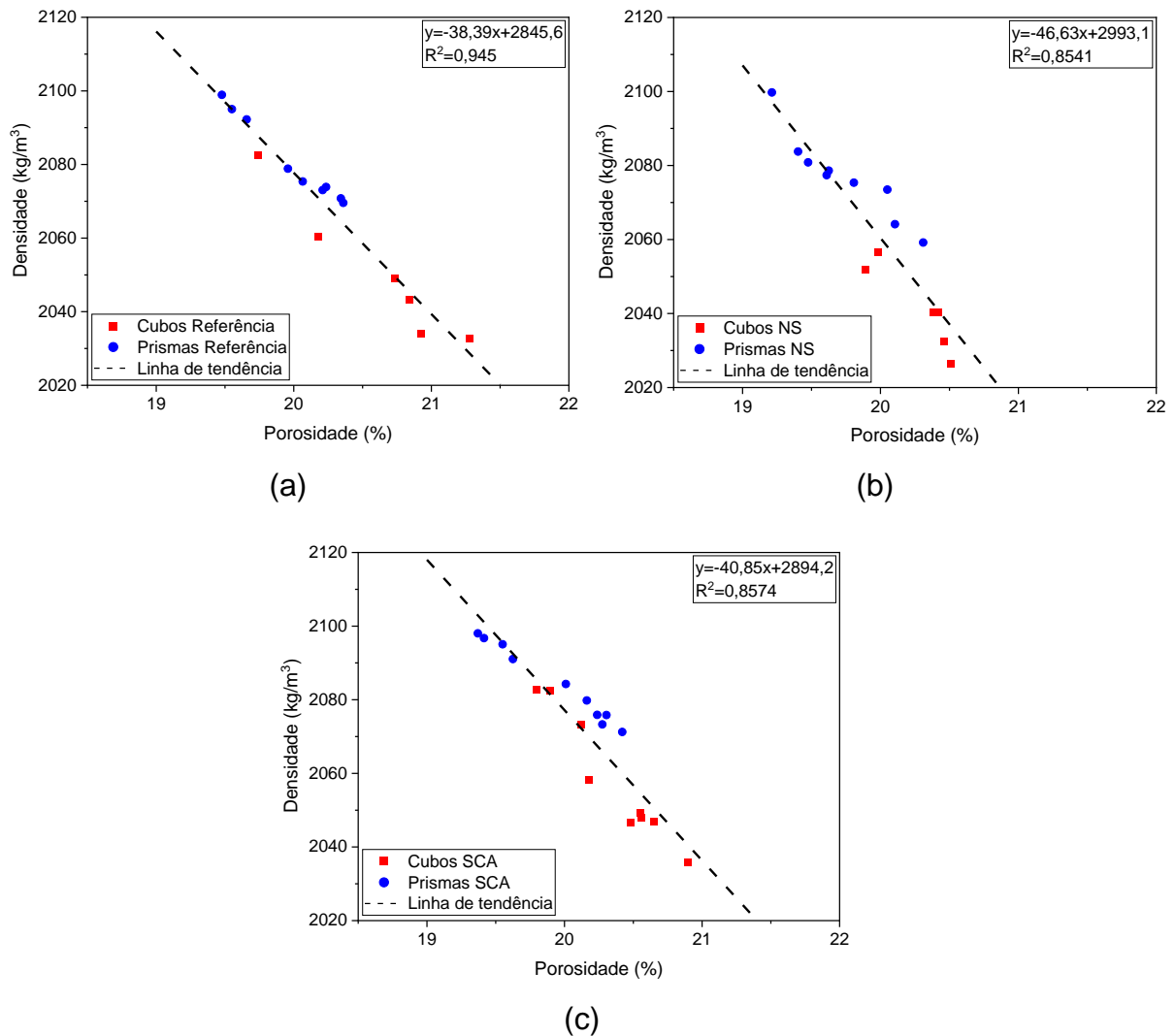
Tabela 4.1 – Densidade média no estado endurecido e porosidade para a mistura de referência e para as misturas com adição de NS e de SCA.

Tipo de corpo de prova	Densidade, média (kg/m³)	Erro (%)	Porosidade, média (%)	Erro (%)
Cubos referência (150x150x150 mm)	2050,3±18,8	-1,1	20,62±0,56	+3,1
Prismas referência (150x150x150 mm)	2080,9±11,3	+0,4	19,98±0,34	-0,1
Cubos NS (100x100x400 mm)	2041,4±11,4	-2,1	20,28±0,27	+1,4
Prismas NS (100x100x400 mm)	2076,9±11,6	-0,4	19,73±0,36	-1,3
Cubos SCA (100x100x400 mm)	2058,2±17,2	-1,3	20,35±0,37	+1,7
Prismas SCA (100x100x400 mm)	2084,1±10,3	-0,1	19,94±0,40	-0,3

Fonte: Elaboração própria (2025).

Uma análise estatística ANOVA comprovou, com 95% de confiança, que as médias populacionais de densidade e porosidade não são significativamente diferentes entre os concretos de referência e aqueles com adição de materiais silicosos. No entanto, verificou-se que as médias populacionais relativas ao formato dos corpos de prova divergem significativamente. Dessa forma, a altura do corpo de prova influenciou nos resultados encontrados.

Figura 4.1 - Relação entre densidade endurecida e porosidade para as misturas: (a) referência, (b) com adição de NS e (c) com adição de SCA.



Fonte: Elaboração própria (2025).

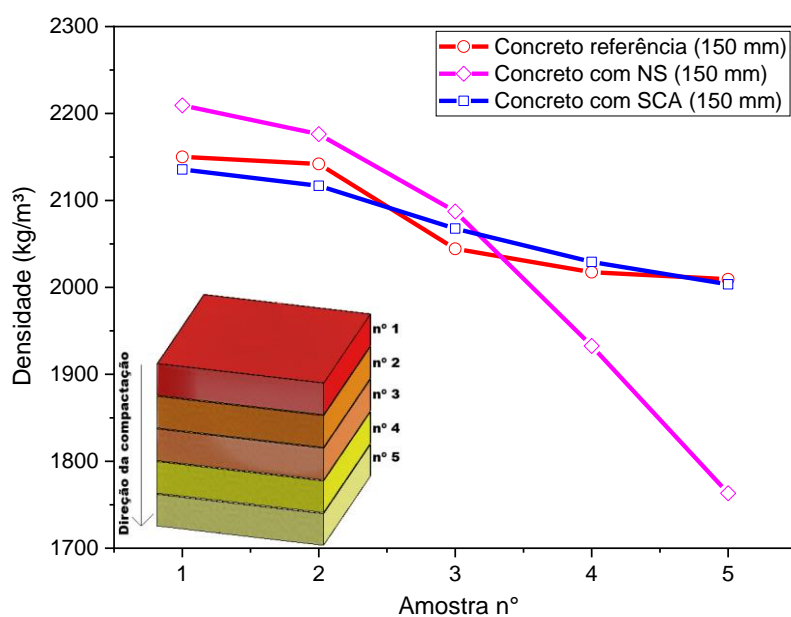
Essa diferença pode ser explicada pelo efeito da variação da porosidade ao longo da altura do corpo de prova, que também altera naturalmente sua densidade em função da profundidade. Essa variação é governada, principalmente, pelo processo de compactação quando realizado em uma única camada, resultando em menor porosidade na superfície compactada (topo) e maior porosidade na superfície inferior (MARTIN III; KAYE; PUTMAN, 2014). Portanto, quanto maior a altura da amostra, mais pronunciado será esse efeito, possivelmente explicando a variação observada entre as amostras com 100 mm e 150 mm de altura.

Para averiguar esse fenômeno, tanto amostras cúbicas de referência quanto outras com adição de NS e de SCA - um elemento com altura de 150 mm e outro de

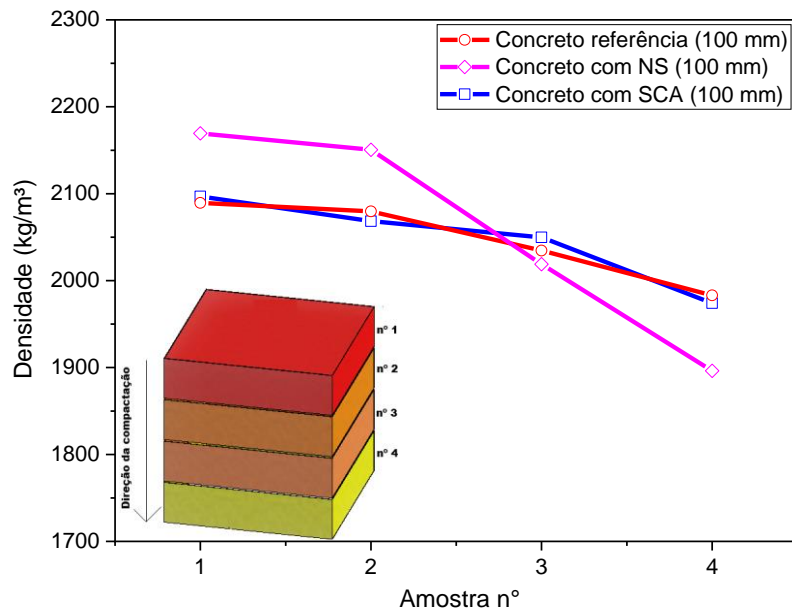
100 mm - foram cortadas perpendicularmente à direção de moldagem/compactação em cinco e quatro fatias, respectivamente, igualmente espaçadas, tendo a densidade mensurada de cada uma.

Os resultados de densidade são apresentados na Figura 4.2, onde a amostra nº 1 corresponde à fatia superior e a amostra nº 5 à inferior. Para a altura de 150 mm, foi constatado que, no concreto de referência, a densidade diminuiu -6,6%, ao passo que, no concreto com adição de NS, a variação foi de -20,2% e no concreto com adição de SCA foi de -6,2%, da amostra nº 1 para a amostra nº 5. Em relação aos cubos de 100 mm de altura, a variação foi de -5,1% para a mistura referencial e de -12,6% e -5,8% para as misturas contendo NS e SCA, respectivamente. O concreto com NS apresentou maior densidade próxima ao topo (superfície compactada) do que o concreto de referência e o com SCA, ambos com valores bastante próximos, independentemente da altura do bloco. Contudo, a superfície inferior exibiu menor densidade. Isso é atribuído à menor trabalhabilidade da mistura durante a moldagem. As formas das curvas são semelhantes para ambos os tipos de concreto, mas deslocadas em função do efeito da altura do bloco. Somado a isso, a maior altura de corpo de prova exige um esforço adicional de compactação, dificultando o eficaz acondicionamento da massa necessária no molde.

Figura 4.2 - Densidade em relação ao nº de amostra para as três misturas analisadas: (a) cubos com 150 mm de altura e (b) cubos com 100 mm de altura.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2025).

4.2 Taxa de infiltração de água

A taxa média de infiltração para a mistura de referência foi de 29572 mm/h (0,82 cm/s), com desvio padrão de 695 mm/h. Para a mistura com adição de NS, a taxa média foi de 17601 mm/h (0,49 cm/s), com desvio padrão de 528 mm/h. Já para a mistura com adição de SCA, a infiltração média foi de 22808 mm/h (0,63 cm/s), com desvio padrão de 935 mm/h. Todos os resultados estão em concordância com a faixa recomendada pelo ACI PRC-522-23 (2023), de 0,17 cm/s a 1,20 cm/s. A mistura com nanomaterial apresentou uma taxa de infiltração aproximadamente 40% inferior à da referência, atribuída à consistência com reduzida trabalhabilidade da mistura, que ocasionou uma camada superficial mais densa, justamente na região de contato com o fluxo de água durante o ensaio, limitando sua aptidão drenante. (RAO *et al.*, 2020).

Esse fato está alinhado com a variação dos valores observados na literatura. Hu *et al.* (2020) e Joshi e Dave (2022), utilizando uma faixa de tamanho de partícula de 4,75 mm a 10 mm e uma porosidade-alvo de 20%, encontraram valores médios de infiltração de 35000 mm/h (0,97 cm/s) e 7100 mm/h (0,21 cm/s), respectivamente. Apesar das semelhanças em porosidade e granulometria, houve uma diferença expressiva entre os resultados dos dois estudos. Isso foi influenciado pelo método e

energia de compactação aplicados em cada caso, condicionando o acabamento superficial do concreto permeável, tornando-o mais aberto ou mais fechado.

4.3 Resistência à tração na flexão em quatro pontos

As misturas foram submetidas ao ensaio de tração na flexão aos 28 dias de idade. Adicionalmente, a mistura com adição de SCA também foi testada aos 56 dias, considerando seu potencial esperado de ganho contínuo de desempenho, favorecido pelas reações pozolânicas ao longo do tempo. Os resultados de resistência média à tração na flexão e módulo de elasticidade encontrados para o concreto permeável dosado com o MEC encontram-se na Tabela 4.2. Com base em uma análise estatística ANOVA, com 95% de confiança, não foram observadas diferenças significativas na resistência à flexão nem no módulo de elasticidade entre as três misturas analisadas aos 28 dias. Contudo, na idade mais avançada, a mistura com adição de SCA apresentou evolução significativa de desempenho, diferindo-se estatisticamente das misturas avaliadas na idade inicial.

Tabela 4.2 - Resistência média à tração na flexão e módulo de elasticidade para o concreto permeável dosado com o MEC.

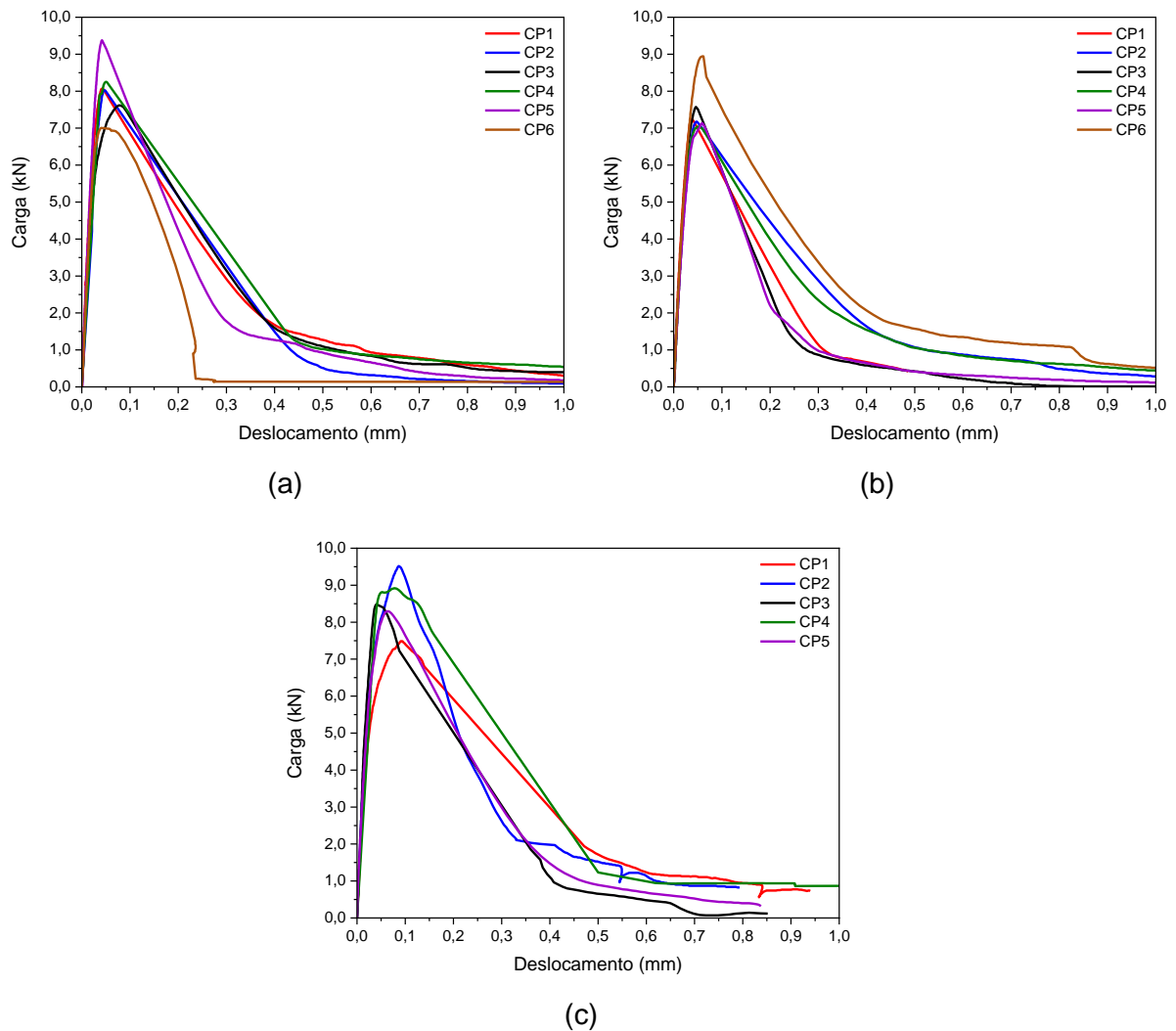
Misturas	Resistência à tração na flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Valor teórico com o MEC (referência)	2,5	15,5
Concreto de referência	2,42±0,24	14,36±2,11
Concreto com adição de NS	2,26±0,22	13,23±0,95
Concreto com adição de SCA (28 dias)	2,56±0,23	13,71±1,73
Concreto com adição de SCA (56 dias)	2,97±0,34	17,36±1,11

Fonte: Elaboração própria (2025).

Nesse cenário, todos os valores de resistência ficaram acima de 2 MPa, conforme exigido pela norma NBR 16416 (2015), sendo, portanto, adequados para o tráfego leve de veículos. Além disso, os resultados alcançados situaram-se próximos

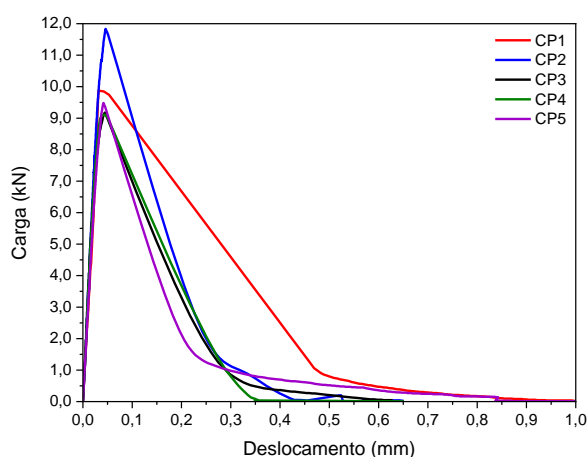
da média de 2,5 MPa obtida a partir da síntese de artigos disponibilizada na subseção 2.3.3. Para essa avaliação, o erro relativo do módulo de elasticidade da mistura de referência, em comparação com os valores previstos via MEC, foi de -7,4%. As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam as curvas carga-deslocamento obtidas para os três tipos de concreto estudados.

Figura 4.3 – Curvas carga-deslocamento aos 28 dias: (a) concreto de referência, (b) concreto com adição de NS e (c) concreto com adição de SCA.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 4.4 – Curva carga-deslocamento aos 56 dias do concreto com adição de SCA.

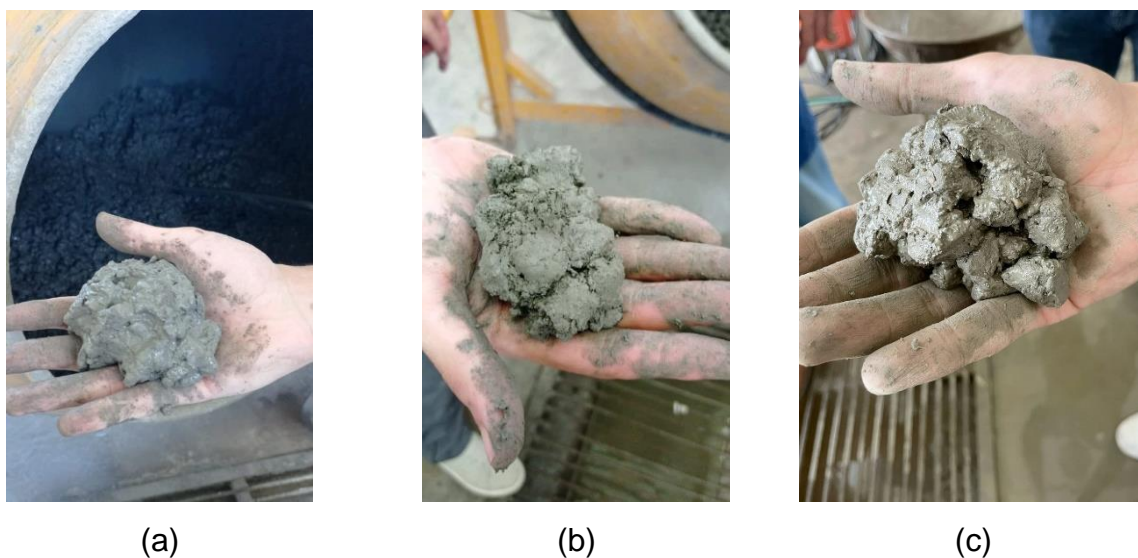


Fonte: Elaboração própria (2025).

Os potenciais benefícios da NS na resistência à tração na flexão, bem como em outras propriedades mecânicas que serão discutidas nos próximos itens, possivelmente foram minimizados em virtude da consistência atingida na mistura com adição de NS, que exigiu maior esforço de compactação para acomodar a massa necessária no molde, em comparação com a mistura de referência e a mistura com adição de SCA, tendo sua trabalhabilidade visivelmente comprometida. A Figura 4.5 apresenta o aspecto das três misturas após o término do processo de mistura. Como pôde ser observado pela inspeção tátil-visual, mesmo com o aumento da dosagem de aditivo na mistura com NS, não foi possível atingir a mesma consistência dos demais concretos, apresentando um aspecto mais seco e menos brilhoso na pasta de cimento.

Essa menor trabalhabilidade, por consequência, originou uma variação significativa na densidade do topo à base do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 4.2 disponibilizada anteriormente na seção 4.1 (MARTIN III; KAYE; PUTMAN, 2014; RAO *et al.*, 2020). Essa redução expressiva de densidade inevitavelmente exerceu um efeito negativo sobre a resistência mecânica da amostra.

Figura 4.5 – Aspecto após o término do processo de mistura: (a) mistura de referência, (b) mistura com adição de NS e (c) mistura com adição de SCA.



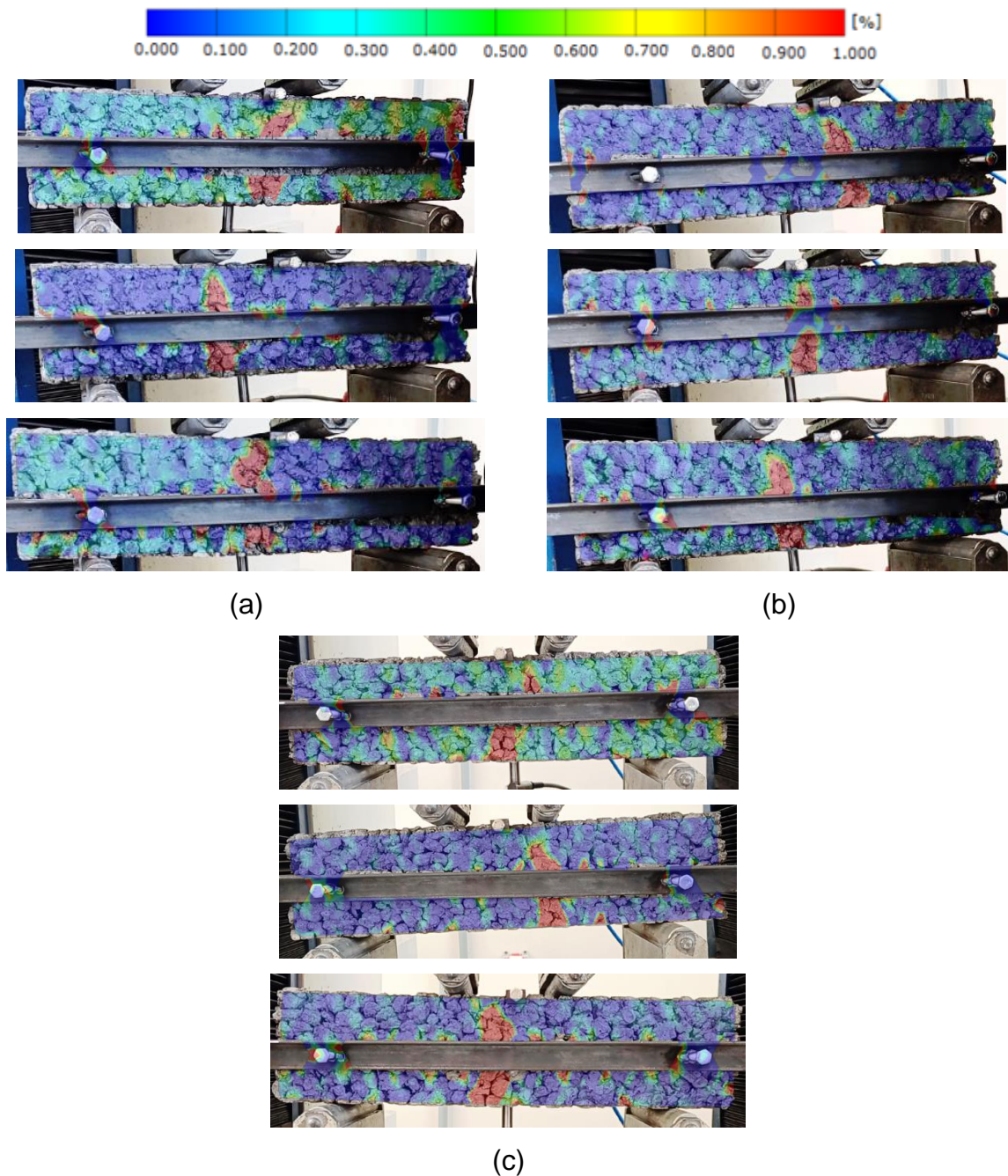
Fonte: Elaboração própria (2025).

Em outros cenários, como em Shirgir *et al.* (2011) e Tarangini *et al.* (2022), os nanomateriais não exibiram essa ausência de melhoria de performance nas propriedades mecânicas. Nesses estudos, a questão da consistência e trabalhabilidade do concreto permeável foi abordada adotando uma relação água/cimento mais elevada, com valores variando entre 0,30 e 0,38, ao contrário dos 0,24 utilizados nesta proposta. Essa abordagem, entretanto, não pôde ser aplicada nesta etapa, porque uma maior relação água/cimento comprometeria acentuadamente os resultados de resistência mecânica, impedindo a obtenção dos valores-alvo.

Já a mistura com adição de SCA não apresentou problemas de redução de trabalhabilidade durante a moldagem, conforme demonstrado pelo comportamento de distribuição da densidade ao longo da profundidade do espécime, muito semelhante ao observado no concreto referencial, com diminuição controlada da densidade da superfície compactada até a base (seção 4.1). Esse fato possibilitou a confirmação de uma tendência de aprimoramento das propriedades mecânicas do concreto permeável. Aos 28 dias de idade, o concreto com SCA apresentou um desempenho 5,8% superior ao do concreto de referência. Ademais, devido à sua capacidade pozolânica, a resistência permaneceu evoluindo aos 56 dias de idade, alcançando um ganho acumulado de 22,7%, em concordância com os estudos de Amadu *et al.* (2021) e Subramaniam e Sathiparan (2023).

Além disso, a Figura 4.6 apresenta os trajetos de fissuração obtidos nos ensaios de flexão em quatro pontos, analisado por meio do *software* GOM. É possível observar que todas as fissuras se formaram entre os pontos de aplicação da carga, ou seja, no terço médio da viga, região típica de fissuração para essa configuração de ensaio.

Figura 4.6 - Trajetos de fissuração na ruptura dos corpos de prova testados em flexão: (a) corpos de prova referência, (b) corpos de prova com adição de NS e (c) corpos de prova com adição de SCA.

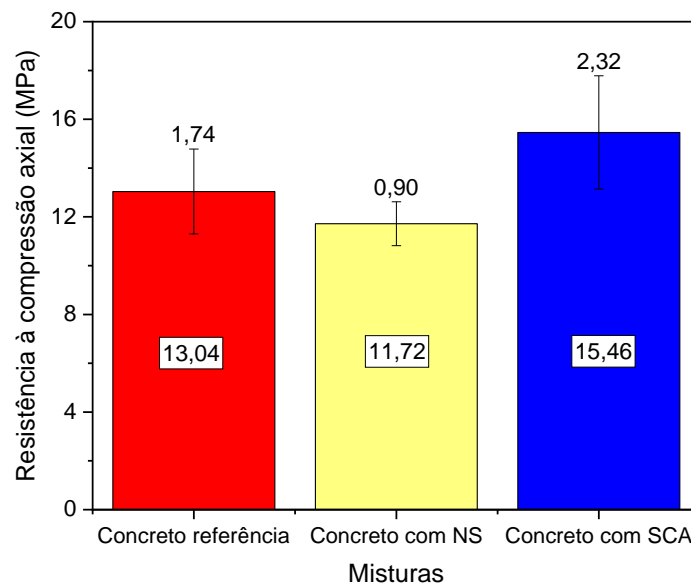


Fonte: Elaboração própria (2025).

4.4 Resistência à compressão axial

Aos 28 dias de idade, a resistência média à compressão dos cubos de referência foi de $13,04 \pm 1,74$ MPa, enquanto os cubos com adição de NS apresentaram $11,72 \pm 0,90$ MPa, e os cubos com adição de SCA atingiram $15,46 \pm 2,32$ MPa, conforme exibido na Figura 4.7. Aos 56 dias, a resistência média da mistura com SCA foi igual a $16,26 \pm 1,65$ MPa. Uma análise ANOVA, com 95% de confiança, indicou que somente houve diferença significativa entre os resultados obtidos nas composições com NS e com SCA. Para o concreto permeável de referência, o erro relativo em relação ao valor de projeto no BétonLab Pro3 foi de -7,5%, demonstrando que os valores teóricos previstos por meio do MEC são precisos.

Figura 4.7 - Resistência média à compressão para o concreto permeável dosado com o MEC.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Os valores obtidos de resistência média à compressão estão dentro da faixa estabelecida pela ACI PRC-522-23 (2023), que varia de 2,8 a 28 MPa. Quando comparados com parte da literatura, os resultados alcançados neste experimento são consistentes com trabalhos que incluíram areia em suas composições. Por exemplo, Nazeer, Kapoor e Singh (2022), em uma mistura contendo 20% de areia, alcançaram resistências médias de 12 MPa em corpos de prova cúbicos aos 28 dias de idade. No

mesmo viés, Pradhan e Behera (2022), que também testaram substituições moderadas de agregado graúdo por areia, obtiveram resistência à compressão igual a 12,1 MPa. Adicionalmente, os resultados encontrados como um todo estão coerentes com a média geral de 14 MPa reportada na revisão de literatura efetuada, a qual indicou que a maioria dos valores de compressão axial situa-se abaixo de 20 MPa, em virtude das características especiais deste compósito.

Além disso, foi elaborada a Tabela 4.3, que fornece um comparativo entre a mistura confeccionada nos testes preliminares, detalhada no Apêndice A, e as melhores misturas resultantes da dosagem com o MEC: a mistura de referência e a mistura com adição de SCA. Nesse comparativo, foi analisado o ganho de resistência em relação ao consumo de aglomerante, demonstrando que, neste último caso, o ganho de resistência foi maximizado, com a eficiência estrutural mais que duplicada, especialmente com a incorporação de SCA. Isso evidencia que a adição de areia e de SCA, aliada à otimização realizada pelo *software* BétonlabPro 3, foi eficaz em proporcionar um desempenho estrutural aprimorado.

Tabela 4.3 – Comparativo do ganho de resistência à compressão axial em relação ao consumo de aglomerante. O índice kPa/kg de aglomerante expressa a eficiência estrutural por unidade de ligante.

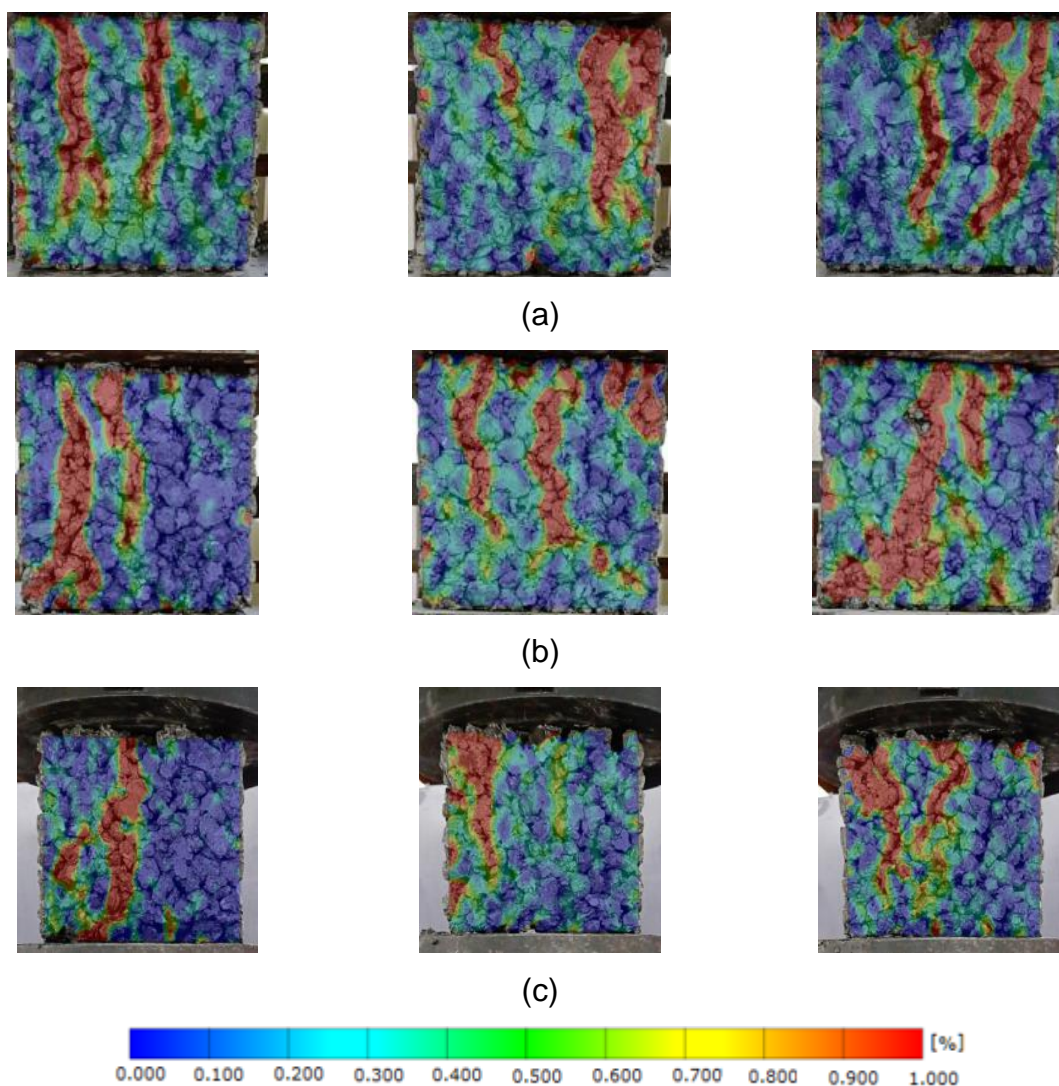
Parâmetros	Costa et al. (2018)	MEC		
		Referência	3% de SCA (28 dias)	3% de SCA (56 dias)
Consumo de aglomerante (kg/m ³)	368,54	456,6	470,3	
Resistência à compressão (MPa)	4,75	13,04	15,46	16,26
kPa/kg de aglomerante	12,89	28,56	32,87	34,57

Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 4.8 mostra uma série de imagens, que exhibe o pós-processamento com o GOM, para facilitar a visualização da distribuição das fissuras nos cubos. Em algumas situações, as fissuras se iniciaram nas extremidades e se estenderam em direção à zona central, enquanto em outras originaram-se no centro e se propagaram para as extremidades, algumas vezes descendo, outras subindo. É importante

salientar que as fissuras tenderam a ser verticais, indicando uma distribuição uniforme dos deslocamentos horizontais ao longo do espécime. Isso demonstra que não houve concentrações de deformações e tensões entre as superfícies de contato do corpo de prova e os pratos da máquina de ensaio, garantindo um estado uniaxial de tensões de compressão. No trabalho de *Bandeira et al. (2022)*, esse efeito foi estudado em concretos autoadensáveis, sendo necessário o emprego de graxa ou placas de teflon para alcançar tal estado de carregamento, evitando o surgimento de fissuras inclinadas a 45° e o consequente padrão de falha em forma de relógio de areia.

Figura 4.8 - Trajetos de fissuração na ruptura dos corpos de prova testados em compressão: (a) corpos de prova de referência, (b) corpos de prova com adição de NS e (c) corpos de prova com adição de SCA.

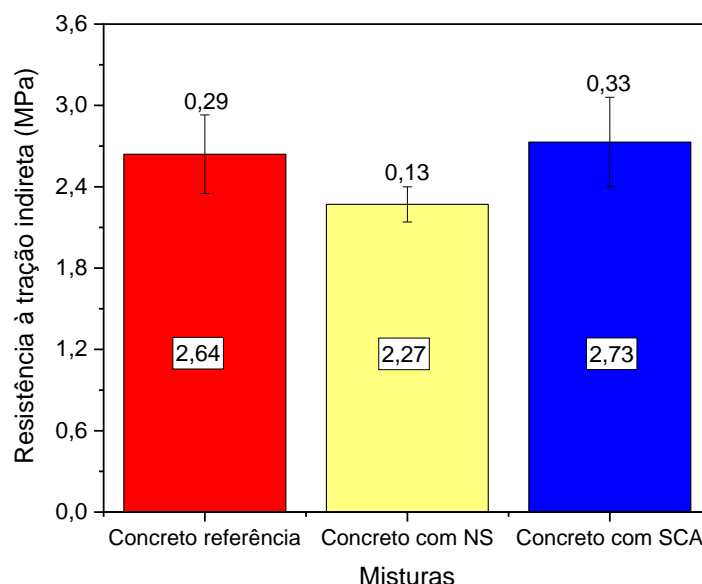


Fonte: Elaboração própria (2025).

4.5 Resistência à tração indireta

Os prismas da mistura de referência alcançaram uma resistência média de $2,64 \pm 0,29$ MPa, enquanto as amostras prismáticas contendo NS e SCA atingiram, respectivamente, $2,27 \pm 0,13$ MPa e $2,73 \pm 0,33$ MPa, aos 28 dias de idade (Figura 4.9). Na idade de 56 dias, a mistura com adição de SCA obteve resistência à tração indireta de $2,84 \pm 0,23$ MPa. Para o concreto de referência, a previsão do *software* BétonLab Pro3 foi de 2,5 MPa para a resistência à tração indireta, mostrando uma variação de apenas +5,6% com os valores coletados experimentalmente. Dessa forma, verifica-se novamente que essa metodologia é eficaz na estimativa dos resultados que serão posteriormente observados em laboratório, podendo ser utilizada como suporte para desenvolver composições otimizadas, com a finalidade de atender as necessidades de desempenho desejadas.

Figura 4.9 - Resistência média à tração indireta para o concreto permeável dosado com o MEC.

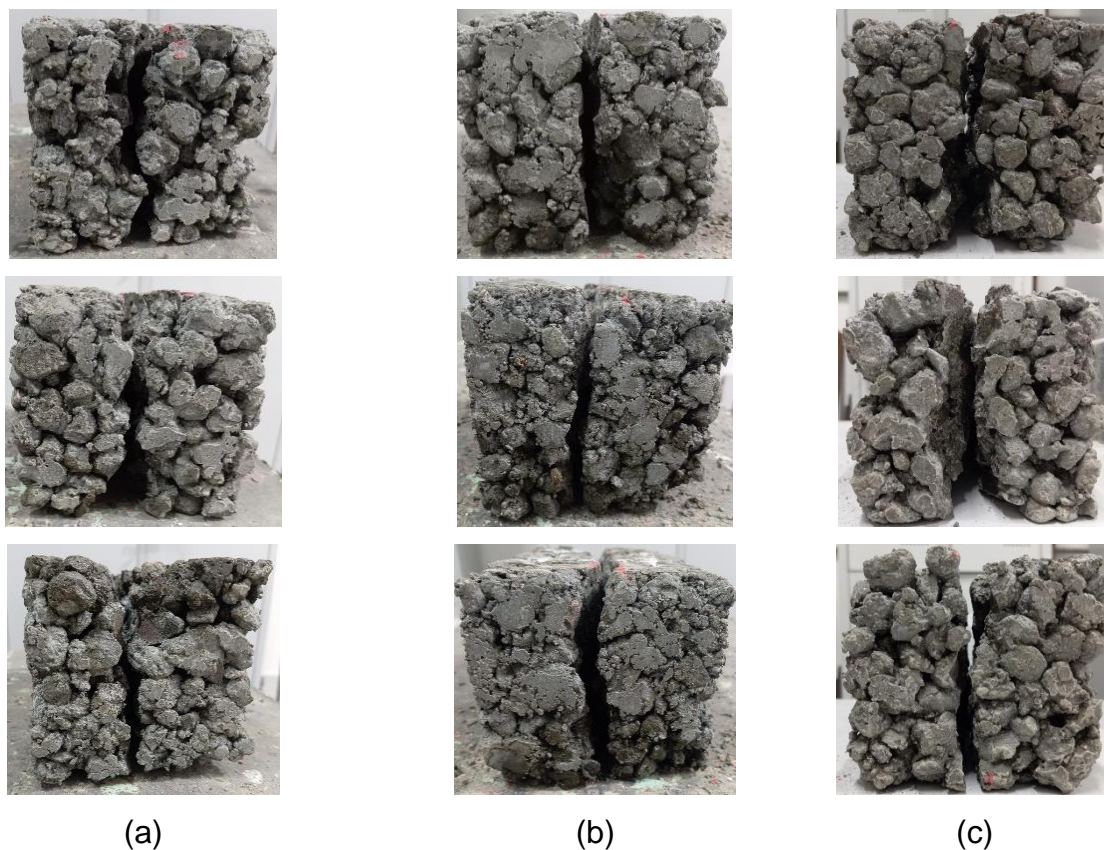


Fonte: Elaboração própria (2025).

A característica de falha dos prismas foi consistente com o comportamento comumente observado em concretos submetidos ao ensaio de tração indireta, conforme ilustrado na Figura 4.10. As amostras se romperam em duas partes semelhantes, com a formação de uma fissura na direção da carga aplicada.

Ressaltando que, durante a execução do ensaio, as amostras foram carregadas exclusivamente na direção da moldagem e da compactação por rolo.

Figura 4.10 - Trajetos de fissuração na ruptura dos corpos de prova testados em tração indireta: (a) amostras de referência, (b) amostras com adição de NS e (c) amostras com adição de SCA.



Fonte: Elaboração própria (2025).

4.6 Resultados das simulações de misturas através do *software* BétonlabPro 3

A forma adotada para verificar a precisão da metodologia do MEC foi a comparação entre os valores teóricos previstos pelo *software* BétonlabPro 3 e os resultados experimentais obtidos para a mistura de referência, aos 28 dias de idade. A Tabela 4.4 apresenta os valores estimados para as propriedades mecânicas, os resultados correspondentes encontrados em laboratório e o respectivo erro relativo. Assim, constatou-se uma boa concordância entre os dados, o que reforça a aplicabilidade do modelo para a formulação de misturas de concreto permeável.

Tabela 4.4 – Comparação entre valores teóricos e experimentais das propriedades mecânicas da mistura de referência aos 28 dias.

Propriedades mecânicas	Valores teóricos	Valores experimentais	Erro (%)
Resistência à compressão axial (MPa)	14,1	13,04	-7,5
Resistência à tração indireta (MPa)	2,5	2,64	+5,6
Módulo de elasticidade (GPa)	15,5	14,36	-7,4

Fonte: Elaboração própria (2025).

Adicionalmente, também foram simuladas, por meio do *software*, as propriedades mecânicas da mistura de concreto com adição de 3% de SCA. Novamente, os dados exibidos na Tabela 4.5 indicam boa concordância entre os valores teóricos e os experimentais, destacando a confiabilidade do modelo na previsão do comportamento mecânico de misturas otimizadas.

Tabela 4.5 – Comparação entre valores teóricos e experimentais das propriedades mecânicas da mistura com adição de 3% de SCA aos 28 dias.

Propriedades mecânicas	Valores teóricos	Valores experimentais	Erro (%)
Resistência à compressão axial (MPa)	14,6	15,46	+5,9
Resistência à tração indireta (MPa)	2,6	2,73	+5
Módulo de elasticidade (GPa)	15,2	13,71	-9,8

Fonte: Elaboração própria (2025).

Essas verificações de compatibilidade permitiram prosseguir com simulações adicionais, conforme descrito na metodologia desta dissertação, visando explorar contextos alternativos de dosagem de maneira eficiente e racional.

O primeiro cenário avaliado foi o comportamento do concreto permeável com a mesma composição da mistura de referência, modificando somente a pedra utilizada por outra de menor dimensão, com diâmetro máximo de 9,5 mm. Nessa configuração,

os valores previstos foram: resistência à compressão axial de 17,3 MPa, resistência à tração indireta de 2,8 MPa e módulo de elasticidade de 23,6 GPa, representando ganhos de +22,7%, +12% e +52,3%, respectivamente, em relação à mistura de referência utilizada na campanha experimental.

Outra suposição foi examinar o que ocorreria caso a restrição de 20% de areia em relação ao total de agregados fosse liberada, permanecendo-se, contudo, o teor de vazios igual a 20%. Com esse novo critério, o BétonlabPro 3 recomendou o uso exclusivo do agregado mais fino, ou seja, 100% de areia. Essa composição atingiria, por exemplo, uma resistência à compressão axial de 41 MPa. Entretanto, caso a porosidade de 20% realmente se confirmasse na prática, o material resultante apresentaria uma estrutura sem interconexão entre os poros internos, o que, muito provavelmente, comprometeria as condições mínimas de taxa de infiltração de água exigidas para garantir a funcionalidade de pavimentos de concreto permeável. Por esse motivo, algumas respostas fornecidas pelo modelo devem ser interpretadas com cautela, considerando as particularidades do material em estudo.

Além disso, considerando a exigência da norma NBR 16416 (2015), que determina resistência à tração na flexão igual ou superior a 2 MPa para pavimentos de concreto permeável submetidos ao tráfego leve de veículos, simulou-se a resistência mínima exigida utilizando a menor quantidade de cimento possível, com os limites de 20% de areia e 20% de porosidade. Em seguida, essa mesma configuração foi testada com porosidade mínima de 15%, conforme o intervalo aceitável de 15% a 35% recomendado pela ACI PRC-522-23 (2023). Salienta-se que, nesse segundo caso, é importante verificar experimentalmente se a porosidade prevista realmente proporcionará uma estrutura permeável com taxa de infiltração de água apropriada.

Comparando os resultados da Tabela 4.6, a seguir, com a revisão de literatura sintetizada na Tabela 2.4 desta dissertação, observou-se que a faixa de consumo de cimento entre 290-360 kg/m³, fornece, em média, resistências à compressão de 9,4 MPa e resistências à tração de 2,1 MPa, compatíveis com os valores teóricos encontrados através do MEC. Essa redução no consumo de cimento sugere a viabilidade de produzir concretos mais sustentáveis e economicamente atrativos para aplicações destinadas ao tráfego leve de veículos.

Tabela 4.6 – Parâmetros simulados para composições com resistência mínima à tração de 2 MPa.

Parâmetros teóricos	20% de porosidade	15% de porosidade
Consumo de brita (kg/m ³)	1294,7	1449,9
Consumo de areia (kg/m ³)	298,4	334,2
Consumo de cimento (kg/m ³)	357,8	291,3
Consumo de água (kg/m ³)	111	114,8
Resistência à compressão (MPa)	9,8	9,8
Resistência à tração (MPa)	2	2
Módulo de elasticidade (GPa)	14,1	21,7

Fonte: Elaboração própria (2025).

Retomando o estudo da mistura de referência, agora considerando a substituição parcial do cimento por SCA, com a finalidade de manter o desempenho satisfatório já obtido, constatou-se que o limite máximo de substituição foi em torno de 5%. Teores superiores a esse já indicaram tendência de declínio no comportamento mecânico do concreto permeável.

Em seguida, foi solicitada a máxima resistência possível, respeitando as restrições de 20% de areia na composição dos agregados e porosidade-alvo de 20%, com a inserção de SCA liberada. Os conteúdos dos materiais foram ajustados por m³ de concreto, viabilizando a busca pelo melhor empacotamento nas condições estabelecidas. Com esses parâmetros, foram previstas, aos 28 dias de idade, uma resistência à compressão axial de 20,8 MPa e uma resistência à tração indireta de 3,1 MPa, configurando, em tese, o desempenho mais aprimorado possível. A composição da mistura correspondente foi de 456,6 kg de cimento, 990,2 kg de agregado graúdo, 228,2 kg de areia, 103,6 kg de água e 205,2 kg de SCA, para cada m³ de concreto, resultando em uma densidade final de projeto de 1983,8 kg/m³.

5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como propósito fundamental o desenvolvimento de uma mistura otimizada de concreto permeável, capaz de conciliar propriedades mecânicas satisfatórias com a preservação das características hidráulicas essenciais à sua funcionalidade, visando viabilizar sua aplicação em pavimentos sujeitos ao tráfego leve de veículos. Inicialmente, o estudo analisou uma mistura já existente na literatura, explorando os efeitos da geometria dos corpos de prova, dos procedimentos de moldagem e das diferentes normas técnicas relacionadas aos ensaios mecânicos. A partir disso, foi adotado o MEC como base teórica para a formulação de uma nova mistura, buscando racionalizar o uso dos materiais e eliminar a necessidade de inúmeras tentativas experimentais. Além disso, também foi avaliado o impacto da adição de materiais silicosos, como a NS e a SCA, sobre as propriedades físicas e mecânicas do concreto desenvolvido. Com base nos resultados alcançados, apresentam-se a seguir as considerações referentes a cada um dos objetivos propostos.

- Verificar diferentes geometrias de corpos de prova e normas aplicáveis à execução dos ensaios mecânicos, visando otimizar os procedimentos de moldagem e estratégias de ensaio:

Os testes preliminares executados com a mistura desenvolvida por Costa *et al.* (2018) forneceram informações relevantes sobre configurações experimentais mais práticas e eficientes para a caracterização do concreto permeável. A escolha por cubos moldados diretamente em fôrmas, de acordo com a norma UNI EN 12390-3 (2003), mostrou-se a alternativa mais vantajosa para o ensaio de compressão axial, reduzindo o tempo operacional em laboratório e fornecendo resultados finais menos dispersos. No mesmo viés, a configuração de carregamento em quatro pontos foi adotada no ensaio de tração na flexão, por viabilizar uma instrumentação em que o LVDT mensura o deslocamento diretamente na amostra, proporcionando valores de módulo de elasticidade mais precisos. Além disso, a reutilização racional das seções remanescentes desses prismas após a fratura possibilitou seu reaproveitamento no ensaio de tração indireta, conforme permitido na norma UNI EN 12390-6 (2002), ampliando a otimização dos processos. A comparação entre essas variáveis mostrou-

se fundamental para a padronização de procedimentos metodológicos compatíveis com as particularidades do concreto permeável.

- Encontrar uma metodologia de dosagem eficiente para produzir, a partir de matérias-primas disponíveis, uma mistura otimizada de concreto permeável capaz de suportar as solicitações do tráfego leve de veículos:

A formulação da mistura otimizada teve como suporte teórico o MEC, que permitiu uma abordagem científica para a dosagem do material, evitando processos repetitivos de tentativa e erro. Com a utilização do *software* BétonlabPro 3, foi possível realizar simulações prévias com diferentes proporções dos materiais constituintes, respeitando a porosidade-alvo de 20% e considerando as matérias-primas disponíveis regionalmente. A mistura gerada apresentou desempenho mecânico satisfatório, com destaque especial para os valores de resistência à tração na flexão, que superaram 2 MPa, expandindo sua aplicabilidade em pavimentos destinados ao tráfego leve de veículos. A implementação desse modelo mostrou-se eficiente para o concreto permeável, reforçando seu potencial para simulações de formulações futuras.

- Averiguar as propriedades físicas do material, incluindo densidade, porosidade e taxa de infiltração de água:

As propriedades físicas do concreto permeável produzido na pesquisa foram examinadas com foco na densidade no estado endurecido, porosidade e taxa de infiltração de água, parâmetros essenciais para assegurar a drenagem eficaz do escoamento. A mistura otimizada com o MEC atingiu valores de densidade e porosidade muito próximos aos projetados, evidenciando a eficiência da proposta adotada para o controle dessas propriedades físicas. No tocante à taxa de infiltração de água, os resultados encontrados situaram-se dentro do intervalo recomendado pelo ACI PRC-522-23 (2023) para pavimentos permeáveis, confirmando que o material atendeu, simultaneamente, aos requisitos mecânicos e hidráulicos, o que indica sua viabilidade de aplicação em situações reais de serviço.

- Avaliar o comportamento mecânico do concreto permeável por meio de ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, resistência à tração indireta e determinação do módulo de elasticidade:

A mistura otimizada fornecida pelo modelo apresentou desempenho mecânico satisfatório em todos os ensaios conduzidos. A resistência à compressão axial atingiu valor superior a 13 MPa, aproximando-se da média encontrada na revisão de literatura realizada, enquanto o resultado de resistência à tração na flexão foi igual a 2,42 MPa, superando o valor balizador para permitir sua implementação em pavimentos destinados ao tráfego leve de veículos. O módulo de elasticidade estimado foi de 14,36 GPa, coerente com a estrutura porosa característica desse tipo de material. No ensaio de tração indireta, foi registrada uma resistência de 2,64 MPa. Esses resultados realçam novamente a eficiência da composição empregada na confecção de um concreto permeável com performance mecânica aprimorada.

- Utilizar a adição de micro e nanosílica com o propósito de aprimorar as propriedades mecânicas do concreto permeável:

A adição de materiais silicosos à mistura otimizada foi idealizada com o intuito de potencializar suas propriedades mecânicas. A campanha experimental revelou que a adição de 3% de SCA promoveu melhorias significativas no desempenho do concreto permeável, sem comprometer de modo acentuado os parâmetros hidráulicos exigíveis. Esses ganhos tornaram-se ainda mais expressivos aos 56 dias de idade, em função das reações pozolânicas mais tardias promovidas por esse aglomerante. Em contrapartida, a adição de NS não resultou na maximização esperada, observando-se menor trabalhabilidade da mistura e uma variação acentuada na densidade entre o topo e a base dos corpos de prova, em comparação às demais misturas com distribuição mais uniforme, o que inevitavelmente limitou seus efeitos positivos. Portanto, a incorporação desses materiais silicosos - com destaque para a SCA, um resíduo agroindustrial disponível em abundância na região onde o estudo foi realizado – mostrou-se uma opção viável para proporcionar atributos mecânicos adicionais a uma composição já consolidada, desde que suas características sejam previamente avaliadas quanto à influência na consistência final da mistura, como evidenciado no teste com NS.

- Examinar a correspondência entre os valores obtidos experimentalmente para a mistura e aqueles previstos teoricamente pelo método de dosagem:

A correspondência entre os valores obtidos experimentalmente e aqueles previstos teoricamente pelo MEC foi satisfatória, reforçando a confiabilidade da metodologia adotada. A comparação entre os dados relacionados à mistura de referência apontou índices mínimos de erro relativo para a resistência à compressão axial (-7,5%), resistência à tração indireta (+5,6%) e módulo de elasticidade (-7,4%). Para a mistura contendo 3% de SCA, resultados igualmente próximos também foram verificados, validando a capacidade de previsão do modelo por meio do BétonlabPro 3. Com base nessas respostas positivas, permitiu-se realizar simulações complementares para investigar outros cenários de dosagem, como a utilização de matérias-primas alternativas e diferentes teores de cada componente da mistura, almejando a máxima resistência possível. Dessa maneira, o modelo mostrou-se capacitado para o desenvolvimento de novas formulações de concreto permeável, a partir da validação da abordagem teórica com respaldo nos resultados experimentais.

A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que a implementação do MEC, respeitando as particularidades do concreto permeável e aliada à adição de materiais silicosos, mostrou-se eficiente na formulação de uma mistura otimizada, com desempenho físico e mecânico compatível com as exigências para aplicação em pavimentos submetidos ao tráfego leve de veículos. A proposta adotada consolidou um percurso promissor para o desenvolvimento de misturas sustentáveis e economicamente atrativas. Além do aprimoramento das propriedades do material, o estudo contribuiu para a utilização racional das matérias-primas e para a otimização dos procedimentos de moldagem e ensaio, através da análise criteriosa das variáveis metodológicas disponíveis.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

Como sugestões para pesquisas futuras, incluem-se: a verificação experimental das misturas definidas na seção 4.6, as quais visam alcançar a resistência à tração mínima exigida por norma para o tráfego leve de veículos, empregando o menor consumo de cimento possível; a realização de ensaios mecânicos adicionais, como fratura e fadiga; a análise de custo e ciclo de vida do

material; a investigação de outros teores de SCA na mistura; o reforço com fibras sintéticas para aperfeiçoamento da resistência à tração na flexão; e a avaliação da viabilidade de elementos de drenagem urbana fabricados em concreto permeável, como valetas filtrantes e bocas de lobo com superfícies permeáveis.

REFERÊNCIAS

- ADAMU, Musa *et al.* **Durability performance of pervious concrete containing rice husk ash and calcium carbide: A response surface methodology approach.** *Case Studies in Construction Materials*, v. 14, p. e00547, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00547>
- ADIL, Goran; KEVERN, John T.; MANN, Daniel. **Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 247, p. 118453, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118453>
- ADRESI, Mostafa *et al.* **A comprehensive review on pervious concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 407, p. 133308, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133308>
- AGÊNCIA SENADO. **Número de municípios vulneráveis dobra, com aumento do risco de catástrofes.** Brasília, 2024. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2024/06/07/numero-de-municipios-vulneraveis-dobra-com-aumento-do-risco-de-catastrofes>
- AHMED, T.; HOQUE, S. **Study on pervious concrete pavement mix designs.** In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2020. p. 012062. doi:10.1088/1755-1315/476/1/012062
- AKKAYA, Ahmet; ÇAĞATAY, İsmail Hakkı. **Investigation of the density, porosity, and permeability properties of pervious concrete with different methods.** *Construction and Building Materials*, v. 294, p. 123539, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123539>
- ALI, Md Tushar; RASHID, Muhammad Harunur. **The effects of coarser sand addition on thermal properties of pervious concrete.** *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 9, n. 10, p. 402, 2024. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01711-2>
- ALSHAREEDA, Othman *et al.* **Field performance evaluation of pervious concrete pavement reinforced with novel discrete reinforcement.** *Case Studies in Construction Materials*, v. 10, p. e00231, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00231>
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI PRC-522-23, Pervious Concrete - Report**, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2023.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Permeable pavements.** PERMEABLE PAVEMENTS TASK COMMITTEE, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1754/C1754M-12, Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete**, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C494/C494M- 17, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete**, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1701/C1701M – 17, **Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete**, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C150/C150M-22, **Standard Specification for Portland Cement**, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C33/C33M-23, **Standard Specification for Concrete Aggregates**, 2023.

ANBURUVEL, Arulanantham; SUBRAMANIAM, Daniel Niruban. **Influence of aggregate gradation and compaction on compressive strength and porosity characteristics of pervious concrete**. International Journal of Pavement Engineering, v. 24, n. 2, p. 2055022, 2023. <https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2055022>

AOKI, Y.; SRI RAVINDRARAJAH, R.; KHABBAZ, H. **Properties of pervious concrete containing fly ash**. Road materials and pavement design, v. 13, n. 1, p. 1-11, 2012. <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.651834>

ARCOLEZI, Karina H. *et al.* **Effect of aggregates packing with the maximum density methodology in pervious concrete**. Sustainability, v. 15, n. 6, p. 4939, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15064939>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222, **Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16416, **Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos**, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605, **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697, **Cimento Portland - Requisitos**, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739, **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768-3, **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 3: Ensaios de caracterização**, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215, **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916, **Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água**, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16917, **Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água**, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211, **Agregados para concreto - Requisitos**, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054, **Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio**, 2022.

AZAD, Amaanuddin M. *et al.* **Pervious geopolymer concrete as sustainable material for environmental application**. *Materials Letters*, v. 318, p. 132176, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132176>

BANDEIRA, Matthews Vargas Vaucher *et al.* **Influence of contact friction in compression tests of concrete samples**. *Construction and Building Materials*, v. 317, p. 125811, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125811>

BATEZINI, Rafael *et al.* **Experimental appraisal for characterizing laboratorial and field performance parameters of pervious concrete pavement**. *Ambiente Construído*, v. 21, p. 177-194, 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000200520>

BILAL, Hassan *et al.* **Influence of silica fume, metakaolin & SBR latex on strength and durability performance of pervious concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 275, p. 122124, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122124>

BONICELLI, Alessandra; GIUSTOZZI, Filippo; CRISPINO, Maurizio. Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. **Construction and Building materials**, v. 91, p. 102-110, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.012>

BRASILEIRO, Kelly Patrícia Torres Vieira *et al.* **Influence of recycled aggregates and silica fume on the performance of pervious concrete**. *Journal of Building Engineering*, v. 82, p. 108347, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108347>

CASTRO, Sarah Bueno de; CARASEK, Helena. **Influence of aggregate size on pervious concrete properties with and without construction and demolition waste**. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, v. 29, n. 3, p. 421-437, 2025. <https://doi.org/10.1080/19648189.2024.2404067>

CHANDRAPPA, Anush K.; BILIGIRI, Krishna Prapoorna. **Pervious concrete as a sustainable pavement material–Research findings and future prospects: A state-of-the-art review**. *Construction and building materials*, v. 111, p. 262-274, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054>

CHOCKALINGAM, T.; VIJAYAPRABHA, C.; RAJ, J. Leon. **Experimental study on size of aggregates, size and shape of specimens on strength characteristics of pervious concrete**. Construction and Building Materials, v. 385, p. 131320, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131320>

COMITÊ TÉCNICO IBRACON DE PAVIMENTOS DE CONCRETO. CT 306, **PAVIMENTO URBANO DE CONCRETO PERMEÁVEL MOLDADO IN LOCO: Prática Recomendada para Dosagem, Projeto Hidráulico, Estrutural, Execução e Manutenção**, 2024.

COSTA, Fernanda Bianchi Pereira da *et al.* **Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 11, n. 05, p. 1151-1159, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952018000500013>

DAUKŠYS, M.; DUNAUSKAS, A.; JUOČIŪNAS, S. **Effect of coarse aggregate characteristics on the permeability properties of pervious concrete**. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2023. p. 012004. doi:10.1088/1757-899X/1276/1/012004

DE LARRARD, Francois. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. CRC Press, 1999. <https://doi.org/10.1201/9781482272055>

EL-HASSAN, Hilal; KIANMEHR, Peiman; ZOUAOUI, Souhail. **Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag**. Construction and Building Materials, v. 212, p. 164-175, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.325>

ENTE ITALIANO DI NORMAZIONE. UNI EN 12390-5, **Testing hardened concrete - Flexural strength of test specimens**, 2002.

ENTE ITALIANO DI NORMAZIONE. UNI EN 12390-6, **Testing hardened concrete - Tensile splitting strength of test specimens**, 2002.

ENTE ITALIANO DI NORMAZIONE. UNI EN 12390-3, **Testing hardened concrete - Compressive strength of test specimens**, 2003.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Pervious concrete**. Advanced concrete pavement technology, 2012.

FENG, Boyu; ZHANG, Ying; BOURKE, Robin. **Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models**. Natural Hazards, v. 106, n. 1, p. 613-627, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04480-0>

FERIĆ, Kajo *et al.* **Effect of aggregate size and compaction on the strength and hydraulic properties of pervious concrete**. Sustainability, v. 15, n. 2, p. 1146, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15021146>

FORMAGINI, Sidiclei. **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho**, 2005. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil) – COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ.

GCP APPLIED TECHNOLOGIES. **V-MAR® VSC500**. Cambridge: GCP Applied Technologies, 2024. Disponível em: <https://gcpat.com/en/solutions/products/v-mar-admixtures/v-mar-vsc500-data-sheet>.

GOM GMBH. **GOM Correlate**. Braunschweig: GOM GmbH, 2019. Disponível em: <https://www.zeiss.com/metrology/en/software/metrology-software.html>

GRIGG, Neil S. **Stormwater Management: An Integrated Approach to Support Healthy, Livable, and Ecological Cities**. Urban Science, v. 8, n. 3, p. 89, 2024. <https://doi.org/10.3390/urbansci8030089>

HELENE, Paulo RL; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1992.

GUPTA, Rishi. **Monitoring in situ performance of pervious concrete in British Columbia - A pilot study**. Case Studies in Construction Materials, v. 1, p. 1-9, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2013.10.001>

HESAMI, Saeid; AHMADI, Saeed; NEMATZADEH, Mahdi. **Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement**. Construction and Building Materials, v. 53, p. 680-691, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.070>

HU, *Nian et al.* **A field performance evaluation of the periodic maintenance for pervious concrete pavement**. Journal of Cleaner Production, v. 263, p. 121463, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121463>

HUANG, Jinlin; LUO, Zhibin; KHAN, Muhammad Basit Ehsan. **Impact of aggregate type and size and mineral admixtures on the properties of pervious concrete: An experimental investigation**. Construction and Building Materials, v. 265, p. 120759, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120759>

HUANG, Wei; WANG, Hao. **Geopolymer pervious concrete modified with granulated blast furnace slag: Microscale characterization and mechanical strength**. Journal of Cleaner Production, v. 328, p. 129469, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129469>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2022: 87% da população brasileira vive em áreas urbanas**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/41901-censo-2022-87-da-populacao-brasileira-vive-em-areas-urbanas>

INTERNATIONAL STANDARD. ISO 1920-4, **Testing of concrete - Part 4: Strength of hardened concrete**, 2020.

JAIN, A. K.; CHOUHAN, J. S. **Effect of shape of aggregate on compressive strength and permeability properties of pervious concrete**. International journal of advanced engineering research and studies, v. 1, n. 1, p. 120-126, 2011.

JOSHI, Tejas; DAVE, Urmil. **Construction of pervious concrete pavement stretch, Ahmedabad, India–Case study**. Case Studies in Construction Materials, v. 16, p. e00622, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00622>

JOSHI, Tejas; DAVE, Urmil. **Development of mixture design of pervious concrete with changing coarse aggregate size**. Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, v. 103, n. 3, p. 733-745, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40030-022-00660-2>

KHANKHAJE, Elnaz *et al.* **Laboratory evaluation of heavy metal removal from stormwater runoff by pervious concrete pavement containing seashell and oil palm kernel shell**. Construction and Building Materials, v. 400, p. 132648, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132648>

LEDERLE, Rita; SHEPARD, Thomas; MEZA, Vanessa De La Vega. **Comparison of methods for measuring infiltration rate of pervious concrete**. Construction and Building Materials, v. 244, p. 118339, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118339>

LI, Qiuxiang; ZHENG, Jie; FU, Mingfu. **Experimental investigation on influence of molding methods on properties of pervious concrete**. In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022. p. 012055. doi: 10.1088/1742-6596/2148/1/012055

LIU, Rentai *et al.* **Investigation of the porosity distribution, permeability, and mechanical performance of pervious concretes**. Processes, v. 6, n. 7, p. 78, 2018. doi:10.3390/pr6070078

LIU, Hanbing *et al.* **Laboratory evaluation of eco-friendly pervious concrete pavement material containing silica fume**. Applied Sciences, v. 9, n. 1, p. 73, 2019. doi:10.3390/app9010073

LOHRI, Christian Riuji *et al.* **Treatment technologies for urban solid biowaste to create value products: a review with focus on low-and middle-income settings**. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, v. 16, p. 81-130, 2017. DOI 10.1007/s11157-017-9422-5

LUO, YiPing *et al.* **The influence of coarse aggregate gradation on the mechanical properties, durability, and plantability of geopolymers pervious concrete**. Construction and Building Materials, v. 382, p. 131246, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131246>

MAGUESVARI, M. Uma; NARASIMHA, V. L. **Studies on characterization of pervious concrete for pavement applications**. Procedia-Social and Behavioral Sciences, v. 104, p. 198-207, 2013. doi: 10.1016/j.sbspro.2013.11.112

MARTIN III, William D.; KAYE, Nigel B.; PUTMAN, Bradley J. **Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 59, p. 78-84, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.034>

MEININGER, Richard C. **No-fines pervious concrete for paving**. *Concrete International*, v. 10, n. 8, p. 20-27, 1988.

MEICHTRY, R. S. *et al.* **Avaliação da resistência ao cisalhamento em juntas de argamassas com sílica da casca de arroz e fibras de polipropileno em diferentes tempos de aplicação**. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS, 5., 2024, Lisboa. *Atas CERIS*. Lisboa: Atas CERIS, 2024. v. 1, p. 1-3516.

METAXA, Zoi S. *et al.* **Nanomaterials in cementitious composites: An update**. *Molecules*, v. 26, n. 5, p. 1430, 2021. <https://doi.org/10.3390/molecules26051430>

MOHAMMED, Bashar S. *et al.* **Properties of nano-silica modified pervious concrete**. *Case studies in construction materials*, v. 8, p. 409-422, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.03.009>

NAJAH, Nyayu Siti Hidayatun *et al.* **Compressive strength, permeability, and porosity analysis of pervious concrete by variation of A/C without fine aggregate**. In: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2021. p. 020253. <https://doi.org/10.1063/5.0044591>

NAZAR, Sohaib *et al.* **Rheological properties of cementitious composites with and without nano-materials: A comprehensive review**. *Journal of Cleaner Production*, v. 272, p. 122701, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122701>

NAZEER, Mudasir; KAPOOR, Kanish; SINGH, S. P. **Effect of fine aggregates on the strength and hydraulic properties of pervious concrete**. *Journal of Asian Concrete Federation*, v. 8, n. 2, p. 1-7, 2022. <http://dx.doi.org/10.18702/acf.2022.12.8.2.1>

NGUYEN, Dang Hanh *et al.* **A modified method for the design of pervious concrete mix**. *Construction and Building Materials*, v. 73, p. 271-282, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088>

OLIVEIRA, Jonathan Duarte; DA COSTA, Fernanda Bianchi Pereira. **Desempenho hidráulico e mecânico do concreto permeável: análise dos efeitos do fenômeno de entupimento e das técnicas de manutenção**. *Revista Caribeña de Ciências Sociales*, v. 13, n. 2, p. e3655-e3655, 2024. <https://doi.org/10.55905/rcssv13n2-025>

OPISO, Einstine M.; SUPREMO, Reinerio P.; PERODES, Jemima R. **Effects of coal fly ash and fine sawdust on the performance of pervious concrete**. *Heliyon*, v. 5, n. 11, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02783>

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>

PIERALISI, Ricardo *et al.* **Contribuição para o desenvolvimento de uma metodologia de dosagem para concreto permeável baseada no desempenho.** Journal of Urban Technology and Sustainability, v. 3, n. 1, p. 18-27, 2020. <https://doi.org/10.47842/juts.v3i1.19>

PRADHAN, Sujit Kumar; BEHERA, Niranjan. **Performance assessment of pervious concrete road on strength and permeability by using silica fume.** Materials Today: Proceedings, v. 60, p. 559-568, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.018>

PUTMAN, Bradley J.; NEPTUNE, Andrew I. **Comparison of test specimen preparation techniques for pervious concrete pavements.** Construction and Building Materials, v. 25, n. 8, p. 3480-3485, 2011. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.03.039

RAMADHANSYAH, P. J. et al. **Strength and porosity of porous concrete pavement containing nano black rice husk ash.** In: IOP conference series: materials science and engineering. IOP Publishing, 2020. p. 012037. doi:10.1088/1757-899X/712/1/012037

RAO, Yunkang *et al.* **Vertical distribution of pore-aggregate-cement paste in statically compacted pervious concrete.** Construction and Building Materials, v. 237, p. 117605, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117605>

RISSEON, Kathleen DBS *et al.* **Contribution to predicting laboratory pervious concrete behavior through density control and coarse aggregate granulometry.** Case Studies in Construction Materials, v. 20, p. e02837, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02837>

RODRIGUES, Paulo Chagas *et al.* **Effect of pore characteristics on the sound absorption of pervious concretes.** Case Studies in Construction Materials, v. 17, p. e01302, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01302>

SABOO, Nikhil *et al.* **Effect of fly ash and metakaolin on pervious concrete properties.** Construction and Building Materials, v. 223, p. 322-328, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.185>

SAHDEO, Surya Kant; CHANDRAPP, Anush; BILIGIRI, Krishna Prapoorna. **Effect of compaction type and compaction efforts on structural and functional properties of pervious concrete.** Transportation in Developing Economies, v. 7, n. 2, p. 19, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40890-021-00129-0>

SANDOVAL, Gersson FB *et al.* **Proposal of maintenance methodology for pervious concrete (PC) after the phenomenon of clogging.** Construction and Building Materials, v. 248, p. 118672, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118672>

SANDOVAL, Gersson FB; PIERALISI, Ricardo. **Sustainable aggregate impact on pervious concrete abrasion resistance.** Results in Engineering, v. 20, p. 101384, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101384>

SEENI, Bright Singh *et al.* **Effect of silica fume on the physical, hydrological and mechanical properties of pervious concrete.** *Materials Today: Proceedings*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.473>

SHA, Fei *et al.* **Mechanical performance and pore characteristics of pervious concrete.** *Case Studies in Construction Materials*, v. 21, p. e03674, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03674>

SHAFABAKHSH, G. *et al.* **Evaluation of coal waste ash and rice husk ash on properties of pervious concrete pavement.** *International Journal of Engineering-Transactions B: Applications*, v. 29, n. 2, p. 192-201, 2016. doi: 10.5829/idosi.ije.2016.29.02b.08

SHAN, Jingsong *et al.* **Pore characteristics of pervious concrete and their influence on permeability attributes.** *Construction and Building Materials*, v. 327, p. 126874, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126874>

SHANAHAN, Natalya; ZAYED, Abla. **Cement composition and sulfate attack: Part I.** *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 4, p. 618-623, 2007. doi:10.1016/j.cemconres.2006.12.004

SHIRAI, Kazutaka *et al.* **Experimental investigation on the mechanical and interfacial properties of fiber-reinforced geopolymer layer on the tension zone of normal concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 360, p. 129568, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129568>

SHIRGIR, Behrooz; HASSANI, Abolfazl; KHODADADI, Ahmad. **Experimental study on permeability and mechanical properties of nanomodified porous concrete.** *Transportation research record*, v. 2240, n. 1, p. 30-35, 2011. DOI: 10.3141/2240-05

SILVA, ASM da. **Dosagem de concreto pelos métodos de empacotamento compressível e Aïtcin-Faury modificado.** *Rio de Janeiro*, v. 152, 2004.

SILVA, Rodrigo Garozi da *et al.* **The effect of periodic maintenance on pervious concrete pavements.** *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, p. e13078, 2022. Doi: 10.1590/S1517-707620210004.1378

SINGH, Avishreshth; SAMPATH, Prasanna Venkatesh; BILIGIRI, Krishna Prapoorna. **A review of sustainable pervious concrete systems: Emphasis on clogging, material characterization, and environmental aspects.** *Construction and Building Materials*, v. 261, p. 120491, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120491>

SINGH, Seeni Bright; MADASAMY, Murugan. **Investigation of aggregate size effects on properties of basalt and carbon fibre-reinforced pervious concrete.** *Road Materials and Pavement Design*, v. 23, n. 6, p. 1305-1328, 2022. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1886158>

SINGH, Seeni Bright *et al.* **Effect of fly ash addition on the mechanical properties of pervious concrete.** Materials Today: Proceedings, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.165>

STRIEDER, Helena Lunkes *et al.* **Performance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate.** Construction and Building Materials, v. 315, p. 125384, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125384>

SUBRAMANIAM, Daniel Niruban; SATHIPARAN, Navaratnarajah. **Comparative study of fly ash and rice husk ash as cement replacement in pervious concrete: mechanical characteristics and sustainability analysis.** International journal of pavement engineering, v. 24, n. 2, p. 2075867, 2023. <https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2075867>

TANG, Chao-Wei; CHENG, Chiu-Kuei; TSAI, Ching-Yuan. **Mix design and mechanical properties of high-performance pervious concrete.** Materials, v. 12, n. 16, p. 2577, 2019. doi:10.3390/ma12162577

TARANGINI, D.; SRAVANA, P.; RAO, P. Srinivasa. **Effect of nano silica on frost resistance of pervious concrete.** Materials Today: Proceedings, v. 51, p. 2185-2189, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.132>

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Stormwater Best Management Practice - Permeable Pavements.** National Pollutant Discharge Elimination System, 2021.

VUJOVIC, Svetlana *et al.* **Urban heat island: Causes, consequences, and mitigation measures with emphasis on reflective and permeable pavements.** CivilEng, v. 2, n. 2, p. 459-484, 2021. <https://doi.org/10.3390/civileng2020026>

WANG, Hanbing *et al.* **Investigation on the mechanical properties and environmental impacts of pervious concrete containing fly ash based on the cement-aggregate ratio.** Construction and Building Materials, v. 202, p. 387-395, 2019.

WANG, Zhongzhen *et al.* **Influence of paste coating thickness on the compressive strength, permeability, and mesostructure of permeable concrete.** Construction and Building Materials, v. 299, p. 123994, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123994>

YANG, Z. X. *et al.* **Distribution and shape of the pores in water permeable concrete.** In: Materials science forum. Trans Tech Publications Ltd, 2007. p. 227-230. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.544-545.227

ZHANG, Qiuyue *et al.* **Mix design for recycled aggregate pervious concrete based on response surface methodology.** Construction and building materials, v. 259, p. 119776, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119776>

APÊNDICE A – TESTES PRELIMINARES

No estudo preliminar da campanha experimental, adotou-se como referência um concreto permeável desenvolvido por Costa *et al.* (2018), o qual serviu como base para as análises iniciais desta pesquisa. Sua formulação foi efetuada através do consolidado método de dosagem de concretos convencionais IPT-EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992), adaptado para misturas de concreto permeável, sendo denominado método do IBRACON pelo CT 306 (2024). Os autores justificam a escolha desse método porque, a partir do teor dos materiais fornecidos, é possível obter a densidade teórica e utilizá-la como variável de controle para alcançar a porosidade desejada. Essa mistura possuía uma relação agregado/cimento de 4:1, uma relação água/cimento de 0,26 e uma relação aditivo/cimento de 0,007, visando atingir uma porosidade-alvo de 25%.

A partir dessas proporções, Costa *et al.* (2018) analisaram amostras cilíndricas extraídas de blocos de concreto permeável compactados com rolo, simulando a compactação que ocorre em campo. As amostras extraídas apresentaram porosidade de 29% e resistência à compressão de 7,5 MPa, enquanto o bloco, previamente à extração, exibiu uma taxa de infiltração de 13500 mm/h (0,38 cm/s). Em corpos de prova prismáticos, foram alcançados resultados de resistência à tração na flexão de 2,2 MPa e módulo de elasticidade de 17 GPa.

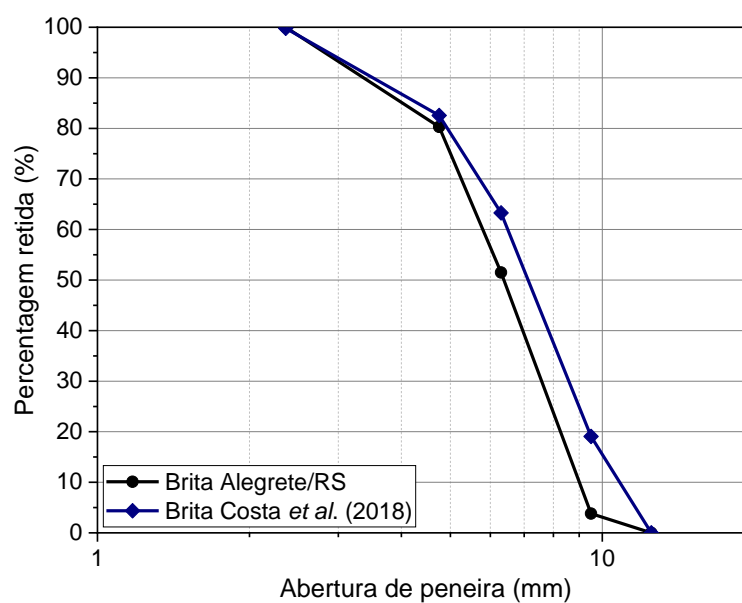
A.1 MATERIAIS E MÉTODOS

O concreto permeável aqui averiguado é composto por 368,5 kg de cimento, 1474,1 kg de agregado graúdo e 97,3 kg de água para cada m³ de mistura. Portanto, a densidade de projeto é dada por $368,5 \text{ kg/m}^3 + 1474,1 \text{ kg/m}^3 + 97,3 \text{ kg/m}^3$, resultando em 1939,9 kg/m³. Em primeira instância, optou-se pela utilização de uma brita oriunda da cidade de Alegrete/RS, que apresentava diâmetro máximo característico (9,5mm) e distribuição granulométrica similares à empregada na pesquisa de referência. No entanto, esse agregado possui maior angularidade e uma forma mais lamelar em comparação ao utilizado por Costa *et al.* (2018). A curva granulométrica encontra-se disponibilizada na Figura A.1.

O aditivo modificador de reologia foi inserido à mistura, projetado para melhorar a reologia do material, facilitando sua aplicação e acabamento. Este aditivo incorpora

um polímero patenteado, fabricado sob condições rigorosamente controladas e atende às especificações da norma ASTM C494 (2017) como um aditivo tipo D. Seu uso é recomendado na proporção de 455 a 980 ml/kg de materiais cimentícios.

Figura A.1 – Curva granulométrica da brita utilizada nos testes preliminares.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Três tipos de corpos de prova foram moldados:

- Cúbicos de 150x150x150 mm (para realizar testes de compressão axial);
- Prismáticos de 100x100x350 mm (para realizar testes de tração na flexão e tração indireta);
- Blocos de 400x400x200 mm (para realizar o teste de taxa de infiltração de água e extrair cilindros para os testes de compressão axial e tração indireta).

Os blocos de 400x400x200 mm foram moldados seguindo os mesmos procedimentos de compactação aplicados aos demais corpos de prova. A extração dos cilindros ocorreu em ambas as direções, resultando em cinco corpos de prova verticais e quatro corpos de prova horizontais (dois cilindros mais alongados) para cada bloco produzido. É importante ressaltar que os cilindros horizontais foram extraídos na altura média do bloco. A Figura A.2 apresenta o processo de extração realizado 14 dias após a moldagem.

Figura A.2 - Procedimento de extração: (a) cilindros verticais e (b) cilindros horizontais.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2025).

A.1.1 Caracterização física

A densidade e a porosidade das amostras foram determinadas utilizando o mesmo método de ensaio descrito na subseção 3.2.7 (ASTM C1754/C1754M, 2012). No entanto, a taxa de infiltração de água foi medida nos blocos de concreto permeável com dimensões de 400x400x200 mm, aos 7 dias de idade, seguindo os protocolos estabelecidos pela norma ASTM C1701 (2017). Para a correta execução do ensaio, um anel de infiltração de plástico (300 mm de diâmetro x 50 mm de altura) foi alocado na área central do bloco. Decorrente disso, o teste de pré-molhagem foi realizado com 3,6 kg de água, preservando-se uma coluna de água padrão entre duas linhas marcadas dentro do anel (10 e 15 mm). Se o tempo de infiltração da pré-molhagem fosse inferior a 30 segundos, 18 kg de água eram utilizados no teste principal. Caso contrário, continuava-se empregando a porção inicial de 3,6 kg. A Figura A.3 ilustra o ensaio de taxa de infiltração realizado nesta etapa experimental.

Figura A.3 – Ensaio de taxa de infiltração de água em bloco de concreto permeável.



Fonte: Elaboração própria (2025).

A.1.2 Avaliação da resistência à compressão axial em diferentes espécimes cúbicos

Antes de fazer a comparação entre a resistência à compressão axial de cilindros extraídos e cubos, foi realizado um estudo prévio no segmento dos cubos, com o intuito de avaliar a influência do processo de obtenção das amostras cúbicas nos valores do ensaio de compressão. Para tal, examinou-se três variações de corpos de prova cúbicos:

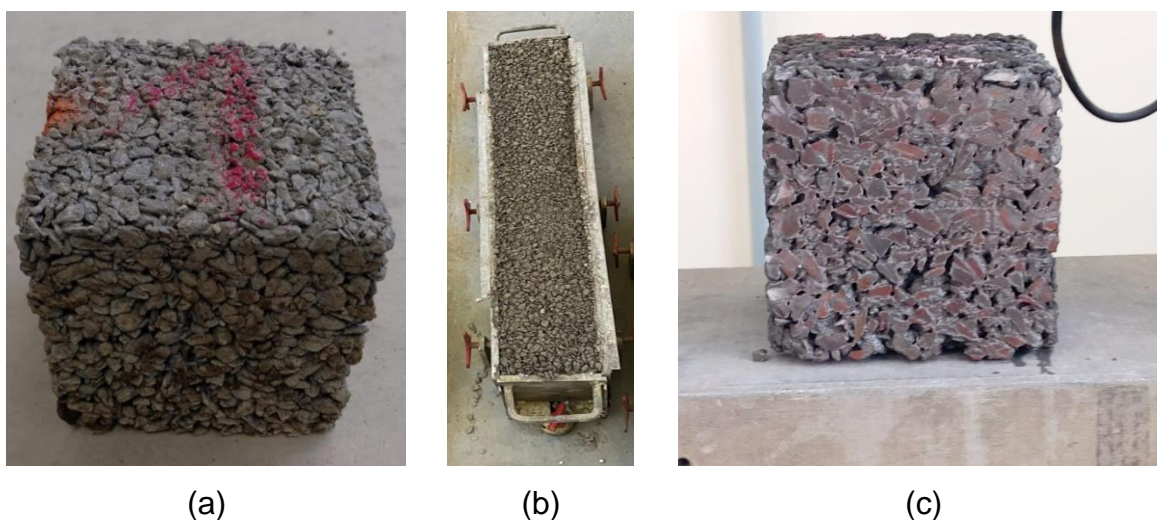
- Cubos moldados diretamente em fôrmas de 150x150x150 mm (Figura A.4(a));
- Cubos de 150x150x150 mm extraídos por corte de corpos prismáticos de 150x150x750 mm (Figura A.4(b));
- Cubos de 100x100x100 mm extraídos por corte de corpos prismáticos de 100x100x350 mm (Figura A.4(c)).

Os ensaios foram executados para verificar se a variação do comprimento dos moldes afetava os resultados, visto que a compactação do concreto permeável foi conduzida por passadas sucessivas de um rolo compactador ao longo das amostras. Essa investigação se mostra relevante, pois os cubos moldados diretamente nas menores fôrmas possuíam uma área reduzida para a compactação, necessitando analisar se um possível efeito das paredes do recipiente interfere na resistência final do material. Além disso, foi avaliado se o procedimento de corte com serra diamantada

impactaria significativamente os valores de resistência à compressão axial encontrados nos cubos extraídos dos corpos prismáticos. Com base nos dados coletados, esta etapa possibilita a seleção do modelo cúbico mais adequado, priorizando a maior praticidade para as análises subsequentes.

Foi utilizada uma máquina de ensaios universal EMIC GR048, equipada com uma célula de carga de 200 kN e controlada a uma taxa de deslocamento de 0,5 mm/min. Os corpos de prova no ensaio de compressão foram carregados seguindo a direção de moldagem e compactação.

Figura A.4 – Modelos cúbicos: (a) cubos de 150x150x150 mm, (b) corpos prismáticos de 150x150x750 mm para extração por corte de cubos e (c) cubos de 100x100x100 mm.



Fonte: Elaboração própria (2025).

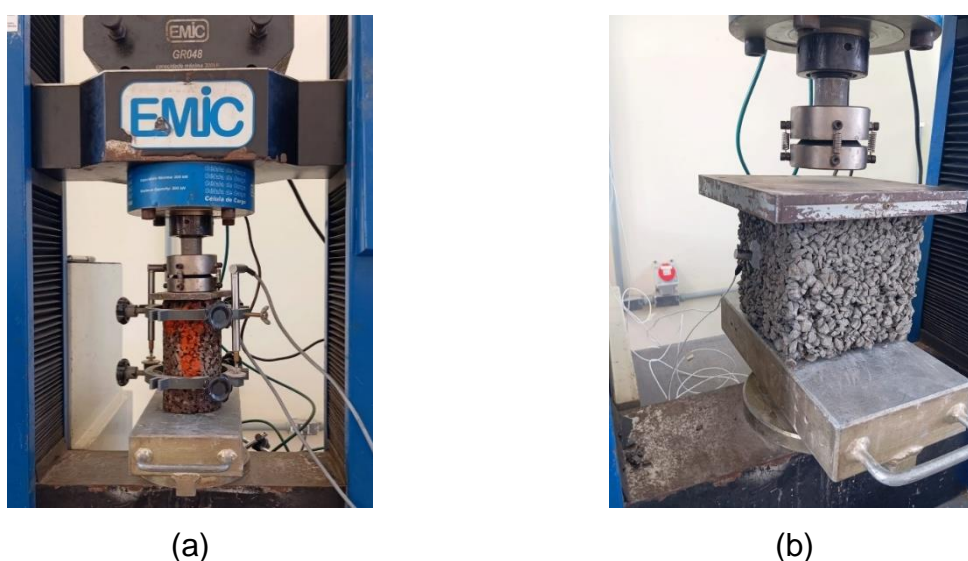
A.1.3 Comparativo da resistência à compressão axial entre cilindros extraídos e cubos

Os ensaios de resistência à compressão axial foram conduzidos em dois formatos geométricos distintos, visando verificar a ocorrência de possíveis variações nos resultados em função da geometria dos corpos de prova. Para os cilindros extraídos dos blocos, seguiram-se as recomendações da norma brasileira NBR 5739 (2018). Enquanto, para as amostras cúbicas, foram adotados os procedimentos relatados na norma europeia UNI EN 12390-3 (2003).

Uma máquina de retificação mecânica retificou as extremidades dos corpos de prova para proporcionar superfícies planas e garantir uma distribuição uniforme da

força de compressão. A resistência à compressão axial foi determinada aos 28 dias de idade, em corpos de prova cilíndricos de aproximadamente 100 mm de diâmetro x 200 mm de altura (Figura A.5(a)) e nos espécimes cúbicos (Figura A.5(b)). A escolha desses espécimes cúbicos levará em consideração as respostas encontradas no estudo efetuado na subseção A.1.2, priorizando maior praticidade na execução da campanha experimental.

Figura A.5 – Ensaio de resistência à compressão axial em: (a) corpos de prova cilíndricos extraídos e (b) corpos de prova cúbicos.



Fonte: Elaboração própria (2025).

A.1.4 Ensaio de tração na flexão em três e quatro pontos

Embora a norma NBR 16416 (2015) estabeleça que o ensaio de tração na flexão em quatro pontos seja o parâmetro para delimitar o tipo de sollicitação que o pavimento de concreto permeável moldado *in loco* pode suportar, optou-se por testar ambas as configurações, três e quatro pontos. O propósito foi averiguar se as diferenças nos modos de carregamento resultariam em variações acentuadas nos valores de resistência e se a instrumentação distinta dos corpos de prova modificaria o comportamento da curva carga vs. deslocamento, originando módulos de elasticidade divergentes.

Os ensaios de resistência à flexão foram realizados de acordo com a norma europeia UNI EN 12390-5 (2002), a qual reporta, em uma nota, que o ensaio de três pontos tende a fornecer resultados 13% maiores aos obtidos pelo método de quatro

pontos. A configuração de carregamento e a instrumentação do ensaio de flexão em quatro pontos, bem como as equações empregadas para a obtenção da resistência e do módulo de elasticidade, estão descritas na subseção 3.2.8 desta dissertação (Figura A.6(a)).

No ensaio de flexão em três pontos, as vigas simplesmente apoiadas foram submetidas a uma carga concentrada no meio do vão. Os ensaios foram realizados nos corpos de prova prismáticos de 100x100x350 mm, de acordo com a recomendação da norma, e conduzidos aos 28 dias de idade. Os ensaios de flexão foram realizados na máquina de ensaios universal EMIC GR048, com uma célula de carga de 200 kN, aplicando um deslocamento controlado de 0,1 mm/min. Durante os ensaios, os corpos de prova foram carregados seguindo a direção de moldagem e adensamento.

Para o ensaio de flexão em três pontos, a viga foi instrumentada somente com um LVDT fixado em seu ponto central (Figura A.6(b)). O módulo de elasticidade em flexão ($E_{flexão, 3 pontos}$) e a resistência à tração na flexão ($f_{TF, 3 pontos}$) foram calculados por intermédio das Equações A.1 e A.2, respectivamente.

$$E_{flexão, 3 pontos} = \frac{Fl^3}{4fbh^3} \quad (A.1)$$

$$f_{TF, 3 pontos}(MPa) = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (A.2)$$

Figura A.6 - Configuração do ensaio de tração na flexão em: (a) quatro pontos e (b) três pontos.



(a)

(b)

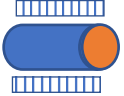
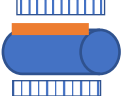
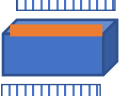








Fonte: Elaboração própria (2025).

A.1.5 Ensaio de tração indireta

O ensaio de tração indireta foi realizado em diferentes formatos geométricos de corpos de prova, incluindo cilindros extraídos dos blocos nas direções vertical e horizontal, prismas de 100x100x350 mm cortados ao meio e cubos de 100x100x100 mm extraídos por corte desses corpos prismáticos. A aplicação da carga foi conduzida de forma linear ao longo do comprimento da amostra, utilizando-se duas tiras de madeira (amostra/suporte), com a finalidade de transferir e acomodar as cargas. Os procedimentos de ensaio foram adotados conforme as recomendações das normas NBR 7222 (2011), UNI EN 12390-6 (2002) e ISO 1920-4 (2020), que estabelecem distintas configurações para o ensaio, variações na geometria permitida dos corpos de prova, dimensões recomendadas para as tiras de madeira, entre outros parâmetros. A Tabela A.1 disponibiliza um detalhamento dos parâmetros normativos vigentes para cada caso aqui analisado.

Os ensaios foram executados em uma máquina de ensaios universal EMIC GR048, equipada com uma célula de carga de 200 kN. Os corpos de prova foram submetidos ao carregamento tanto seguindo a direção de moldagem e adensamento quanto perpendicularmente a ela, permitindo a verificação do impacto da orientação nessa propriedade do concreto permeável. Além disso, é importante destacar que as amostras cilíndricas apresentavam um diâmetro de 92 mm, devido ao fato de esse ser o diâmetro interno do extrator usado para obtê-las, enquanto o comprimento variou de acordo com as condições de extração.

Tabela A.1 – Configuração dos ensaios de tração indireta seguindo diferentes parâmetros normativos. A cor laranja indica a face onde foi realizada a compactação do corpo de prova, enquanto as linhas azuis ilustram o comprimento ao longo do qual a carga foi aplicada durante o ensaio.

Norma	NBR 7222 (2011)		UNI EN 12390-6 (2002)	ISO 1920-4 (2020)			
	Orientação da carga (moldagem e compactação)						
	Cilindros verticais 	Cilindros horizontais 	Prismas UNI EN 	Cubos I ISO 	Cubos II ISO 	Prismas I ISO 	Prismas II ISO 
	Perpendicular	Mesma direção	Mesma direção	Mesma direção	Perpendicular	Mesma direção	Perpendicular
Tiras de madeira	Largura de 15 ± 1 mm e altura de $3,5 \pm 0,5$ mm		Largura de 10 ± 1 mm e altura de 4 ± 1 mm	Largura de 15 ± 2 mm e altura de 4 ± 1 mm			
Execução do ensaio							

A.1.6 Verificação dos efeitos do formato do agregado graúdo na mistura

Neste estágio da pesquisa, investigou-se o impacto do emprego de um agregado graúdo de formato cúbico na mistura de concreto permeável, visto que, conforme relatado na literatura, esse tipo de agregado geralmente proporciona um melhor desempenho ao concreto. Isso acontece devido à sua maior capacidade de empacotamento em relação a partículas alongadas, que tendem a se alinhar e criar pontos de fragilidade na estrutura. No entanto, não foi possível obter, nas proximidades da cidade de Alegrete/RS, uma brita de formato cúbico com faixa granulométrica semelhante à brita lamelar preliminarmente utilizada, o que seria o cenário mais adequado para a análise. Diante dessa limitação, optou-se por aplicar um agregado de formato cúbico com grãos consideravelmente maiores, possuindo um diâmetro máximo característico de 19 mm, em contraste com os 9,5 mm da brita lamelar inicial (ver a distribuição granulométrica apresentada na Figura 3.3).

Diante disso, foi avaliada exatamente a mesma composição estudada nos itens anteriores, buscando averiguar se ela permitiria uma melhora no desempenho mecânico, mantendo a proporção de 4:1 (agregado:cimento) e a relação água/cimento de 0,26, modificando apenas o tipo de agregado usado para a brita cúbica. Nessa composição, foram empregados 365,7 kg de cimento, 1462,9 kg de agregado graúdo e 96,5 kg de água por m³ de mistura, resultando em uma densidade projetada de 1925,1 kg/m³.

Foram submetidos a ensaios de resistência à compressão axial, aos 3, 7 e 28 dias de idade, cubos de 150x150x150 mm. Além disso, para os ensaios de resistência à tração na flexão, foram empregados corpos de prova prismáticos de 100x100x350 mm, e para os ensaios de tração indireta, foram utilizados prismas com aproximadamente metade desse comprimento. Além desses testes, também foram executados ensaios de densidade e porosidade em ambas as geometrias. A Figura A.7 mostra o aspecto das amostras com esse novo agregado graúdo no estado endurecido.

Figura A.7 – Aspecto das amostras com agregado graúdo de formato cúbico no estado endurecido: (a) cubos e (b) prismas.



Fonte: Elaboração própria (2025).

A.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são mostrados e analisados os resultados encontrados nos testes preliminares, englobando os ensaios efetuados nas amostras produzidas utilizando o traço desenvolvido por Costa *et al.* (2018). Os valores coletados permitiram averiguar o desempenho inicial do material em estudo, de modo a disponibilizar subsídios para a otimização dos procedimentos laboratoriais e ajustes nas composições das misturas realizadas na etapa principal do experimento.

A.2.1 Densidade no estado endurecido vs. porosidade

A Tabela A.2 apresenta as médias das densidades no estado endurecido e das porosidades alcançadas experimentalmente, em companhia com os desvios padrão tanto para a densidade quanto para a porosidade, para cada tipo de corpo de prova avaliado neste estudo. Além disso, é mostrado o erro relativo à densidade teórica de projeto, estimada através da dosagem proposta por Costa *et al.* (2018), igual a 1939,9 kg/m³, e ao valor da porosidade de projeto, adotado em 25%.

Tabela A.2 – Densidade média no estado endurecido e porosidade média para todos os tipos de corpos de prova do estudo preliminar.

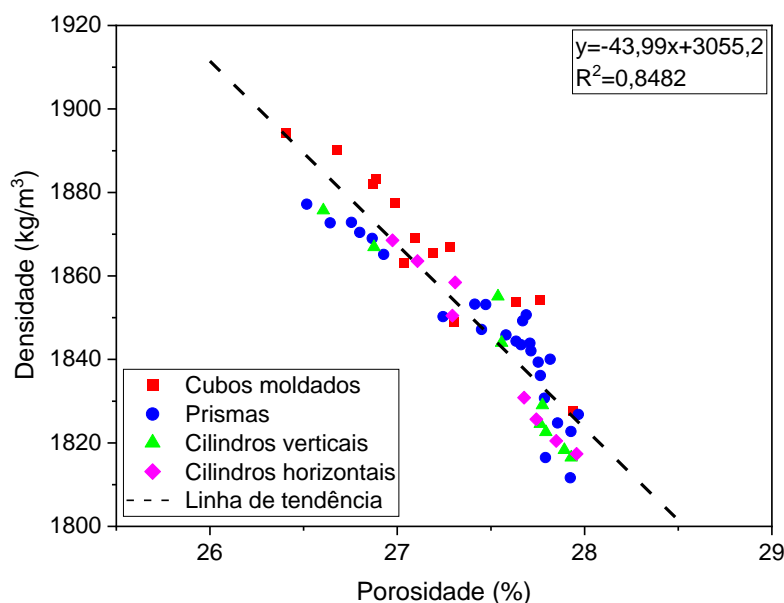
Tipo de corpo de prova	Densidade, média (kg/m³)	Erro (%)	Porosidade, média (%)	Erro (%)
Cubos moldados (150x150x150 mm)	1867,4±18,5	-3,7	27,16±0,43	+8,6
Prismas (100x100x350 mm)	1846,1±17,8	-4,8	27,47±0,44	+9,9
Cilindros verticais extraídos	1839,2±22,1	-5,2	27,53±0,47	+10,1
Cilindros horizontais extraídos	1841,9±20,6	-5,1	27,49±0,36	+10,0

Fonte: Elaboração própria (2025).

A análise estatística comprova, com 95% de confiança, que as médias populacionais de densidade e porosidade não são significativamente diferentes entre si. A densidade média de todas as amostras foi 1849,4±21,2 kg/m³, com uma porosidade média de 27,41±0,44%. Em relação aos valores de projeto, registram-se diferenças relativas de -4,7% e +9,6%, respectivamente. A totalidade dos valores de porosidade está de acordo com o intervalo recomendado pelo ACI PRC-522-23 (2023), que varia entre 15% e 35%, sendo influenciados por fatores como as características da pasta de cimento e o nível de compactação, que desempenham um papel fundamental na determinação da permeabilidade e da resistência mecânica do material.

A Figura A.8 ilustra a relação entre a densidade no estado endurecido e a porosidade para cada corpo de prova produzido. Conforme indicado pela curva de regressão linear, o aumento da densidade está associado à redução dos índices de porosidade. A equação de ajuste dos resultados presente na Figura A.8 prevê uma densidade de 1955,4 kg/m³ para a porosidade-alvo dessa etapa experimental, fixada em 25%. Esse valor representa uma diferença de apenas +0,8% em relação à densidade teórica.

Figura A.8 - Relação entre densidade endurecida e porosidade de cada corpo de prova do estudo preliminar.



A.2.2 Taxa de infiltração de água em blocos de concreto permeável

Antes da extração das amostras cilíndricas, o ensaio de taxa de infiltração de água foi executado nos blocos de concreto permeável. O valor médio de infiltração obtido foi de 18524 mm/h (0,51 cm/s), com um desvio padrão de 420 mm/h. Esse resultado está dentro do intervalo de 0,17 cm/s a 1,20 cm/s, limites definidos para diferentes concretos permeáveis segundo a recomendação normativa ACI PRC-522-23 (2023). Além disso, a taxa de infiltração alcançada é um pouco maior que o valor de 13500 mm/h encontrado por Costa *et al.* (2018). Essa proximidade era esperada, porque foi reproduzida a mesma composição de mistura, somente modificando o agregado graúdo, substituído por outro de similar faixa granulométrica, porém com partículas mais lamelares, visando a adaptação às condições locais. A metodologia de compactação também foi mantida, utilizando rolo compactador. Essa técnica de adensamento é caracterizada por ocasionar uma superfície mais densa, restringindo parcialmente a passagem de água na face superior, o que denota a coerência dos resultados com o comportamento observado em aplicações práticas.

A.2.3 Resistência à compressão axial em diferentes espécimes cúbicos

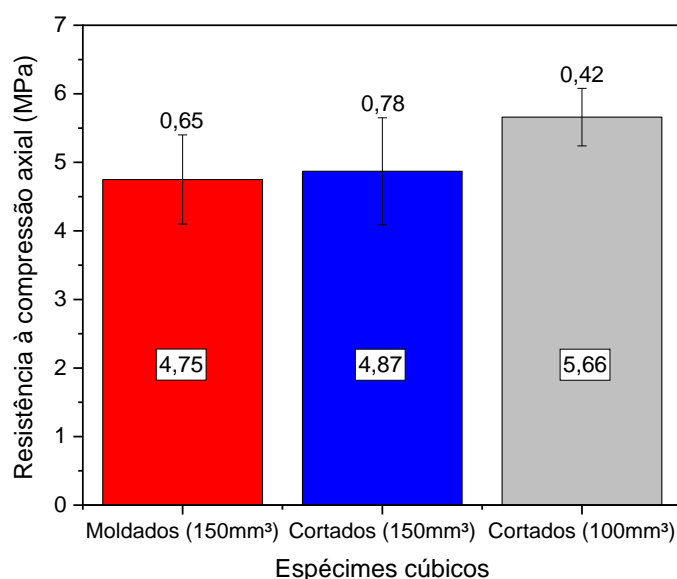
Os ensaios de resistência à compressão axial dos corpos de prova cúbicos foram realizados após 28 dias de cura, sendo estes obtidos por diferentes procedimentos, sejam moldados diretamente ou extraídos por corte de elementos prismáticos de maior comprimento. Foram utilizados cubos moldados em fôrmas de 150x150x150 mm, cubos de 150x150x150 mm cortados de prismas de 150x150x750 mm e cubos de 100x100x100 mm cortados de prismas de 100x100x350 mm. Os valores médios encontrados e os respectivos desvios padrão estão exibidos na Tabela A.3, servindo como base para a criação do gráfico contido na Figura A.9. Os valores encontrados de resistência média à compressão estão dentro da faixa estabelecida pelo ACI PRC-522-23 (2023), que varia de 2,8 a 28 MPa.

Tabela A.3 – Resistência à compressão para diferentes espécimes cúbicos.

Espécime	Resistência à compressão axial (MPa)
Cubos moldados (150x150x150 mm)	4,75±0,65 MPa
Cubos cortados (150x150x150 mm)	4,87±0,78 MPa
Cubos cortados (100x100x100 mm)	5,66±0,42 MPa

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 4.2 – Resistência à compressão axial para diferentes cubos.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Ademais, uma análise ANOVA com 95% de confiança indicou que não há diferença estatisticamente significativa entre as três variações examinadas no segmento cúbico. A partir disso, ficou evidenciado que, para o material aqui avaliado, fatores como a variação do comprimento dos moldes - correlacionada ao possível efeito das paredes do recipiente nas amostras moldadas diretamente em fôrmas menores, onde a área reduzida poderia afetar o efeito do rolo compactador - e o processo de corte com serra diamantada, embora em um primeiro momento considerados passíveis de influenciar os resultados de resistência, não apresentaram impacto significativo nessa propriedade. Adicionalmente, embora a diferença de altura de 50 mm entre cubos de 150 mm e cubos de 100 mm não tenha sido suficiente para alterar significativamente os valores de resistência compressiva, verificou-se que os cubos com 100 mm de altura apresentaram valores de resistência ligeiramente superiores. Em contraste, os cubos de 150 mm exibiram resultados praticamente idênticos, independentemente de terem sido moldados ou extraídos.

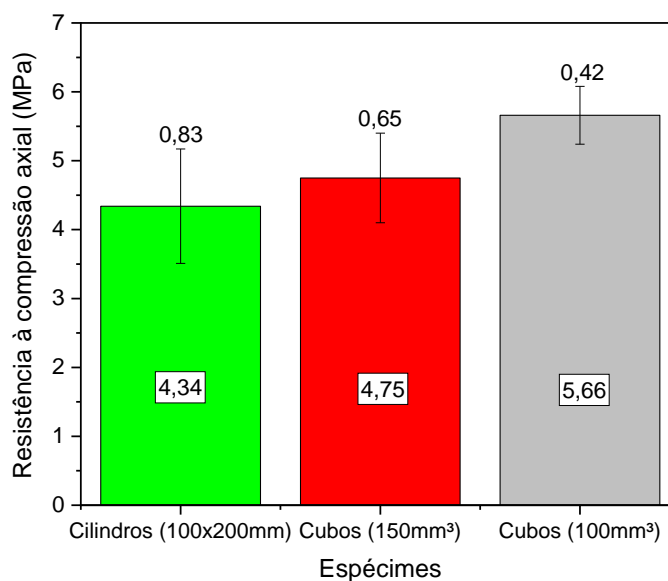
Logo, levando em conta a maior praticidade e o menor tempo operacional, adotou-se o modelo cúbico moldado diretamente em fôrmas de 150x150x150 mm como o mais adequado para a condução dos ensaios posteriores desta dissertação. Esse modelo cúbico de 150 mm e o cúbico de 100 mm extraído por corte foram escolhidos para comparação, no item subsequente, com os corpos de prova cilíndricos extraídos dos blocos permeáveis.

A.2.4 Resistência à compressão axial: efeito do formato geométrico dos corpos de prova

A Figura A.10 apresenta a resistência média à compressão dos cilindros extraídos na direção vertical, comparando-a com os resultados encontrados nos cubos. A resistência média à compressão dos cilindros verticais foi de $4,34 \pm 0,83$ MPa, também não diferindo significativamente, com 95% de confiança, da média de $4,75 \pm 0,65$ MPa obtida nos cubos de 150 mm, porém estatisticamente inferior à dos cubos de 100 mm ($5,66 \pm 0,42$ MPa). Essa descoberta indica que não houve variação da propriedade em função dos formatos geométricos, apenas em relação à diferença de altura quando comparados espécimes de 200 mm e 100 mm de altura. Esse fato pode ser atribuído à maior fragilidade na superfície inferior dos cilindros, em razão da

elevada porosidade nessa região, considerando o efeito do método de compactação em camada única.

Figura A.10 - Resistência à compressão axial para diferentes formatos geométricos.



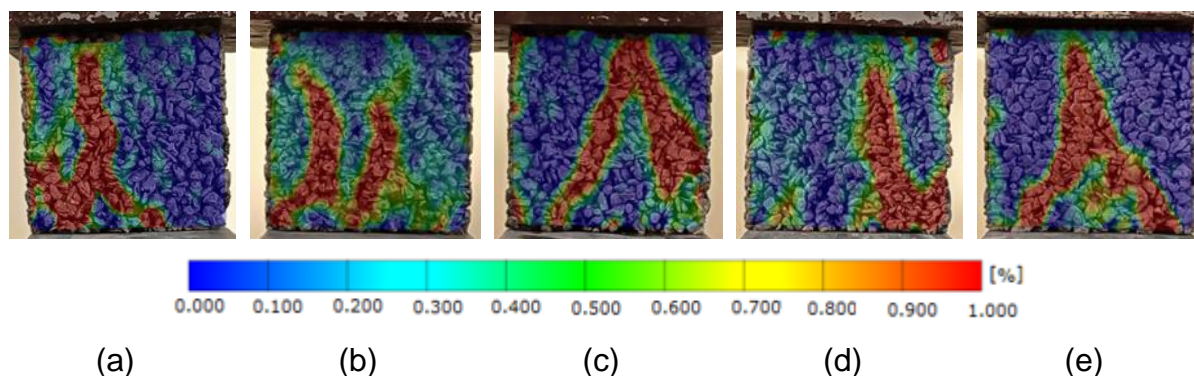
Fonte: Elaboração própria (2025).

Quando comparados com parte da literatura, os resultados encontrados neste estudo preliminar foram semelhantes ou, em alguns casos, ligeiramente inferiores. Por exemplo, em corpos de prova cilíndricos moldados, Batezini *et al.* (2021) conseguiram uma resistência média de 8 MPa. Chockalingam *et al.* (2023) alcançaram resistências médias de 5,6 MPa em corpos de prova cúbicos e 4,9 MPa em corpos de prova cilíndricos. Da mesma forma, em um cenário mais semelhante ao proposto neste trabalho, Oliveira e Costa (2024) relataram uma resistência de 6,6 MPa em cilindros extraídos de blocos. Uma possível explicação para isso é o fato de o agregado graúdo utilizado nesta testagem prévia possuir uma forma bastante lamelar e ser quebradiço, o que pode ter contribuído para a redução da resistência mecânica do material.

Adicionalmente, a Figura A.11 mostra as regiões de abertura de fissuras geradas por esforços de compressão em alguns cubos desse concreto permeável, registradas através de filmagens e correlação digital de imagens via *software* GOM. Essas análises foram realizadas exclusivamente nos cubos, pois suas superfícies

planas permitiam a filmagem frontalmente, enquanto nos cilindros essa abordagem seria mais difícil em virtude de suas características geométricas.

Figura A.11 - Trajeto das fissuras encontrados pós-processamento com GOM a partir do ensaio de resistência à compressão axial.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Diante do exposto, mesmo após a comparação entre as duas geometrias, os cubos moldados permaneceram como a opção mais conveniente. Isso se deve aos valores de resistência média à compressão axial e ao maior desvio padrão verificado nos cilindros extraídos. Além disso, a questão da funcionalidade precisa ser mencionada, pois além do tempo dedicado à extração dos espécimes cilíndricos, a moldagem prévia dos blocos permeáveis (400x400x200 mm) é complexa devido às grandes dimensões da estrutura, exigindo um grande esforço de compactação, visto que a energia não se distribui eficientemente até sua base. Ainda, a extração de corpos de prova pode acarretar a quebra de agregados e/ou microfissuras na argamassa ou na zona de transição entre os materiais, influenciando os resultados individualmente. Outras técnicas de extração, preferencialmente menos agressivas, precisam ser averiguadas.

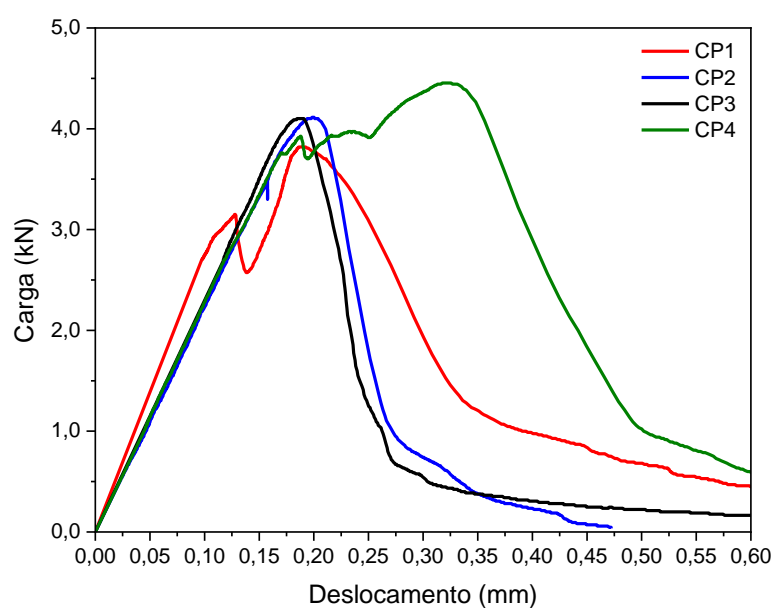
A.2.5 Ensaio de tração na flexão em três e quatro pontos

Nos testes de resistência à tração na flexão em três pontos do concreto permeável, a resistência média encontrada foi de 1,85 MPa, com um desvio padrão de 0,12 MPa. Os valores obtidos permaneceram acima de 1 MPa, conforme exigido pela norma NBR 16416 (2015) para pavimentos permeáveis de concreto, sendo adequados para o uso em tráfego de pedestres. O módulo de elasticidade foi

determinado a partir das curvas carga-deslocamento apresentadas na Figura A.12, com valor médio de $1,59 \pm 0,17$ GPa.

Vale destacar que, no ensaio de três pontos, a viga foi equipada somente com um LVDT posicionado no centro do vão. De forma que, folgas nos apoios e rigidezes dos dispositivos utilizados também foram mensuradas, captando efeitos globais de deslocamento. Assim, há uma tendência de superestimar as deformações, levando a módulos de elasticidade menores do que os reais dos corpos de prova.

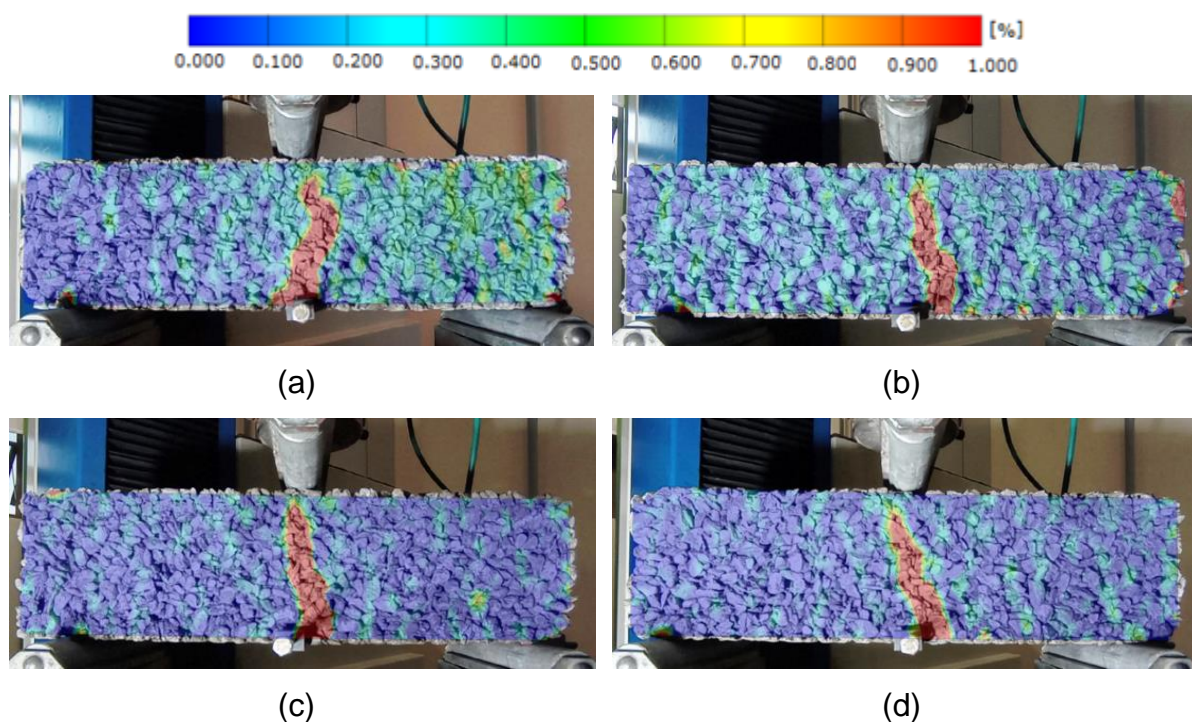
Figura A.12 – Curvas carga-deslocamento em três pontos.



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura A.13 mostra o comportamento pós-fratura do material submetido ao ensaio de tração na flexão em três pontos, analisado também por meio do GOM. É possível observar que a fissuração ocorre de maneira muito semelhante em todos os corpos de prova, concentrando-se majoritariamente na zona central da viga, com a fissura ascendendo de baixo para cima. Esse padrão é característico dos esforços de flexão, tendo em vista que a região inferior da viga está sujeita às maiores tensões de tração, resultando na origem da fissuração nesse ponto.

Figura A.13 – Prismas após fratura em ensaio de tração na flexão em três pontos.



Fonte: Elaboração própria (2025).

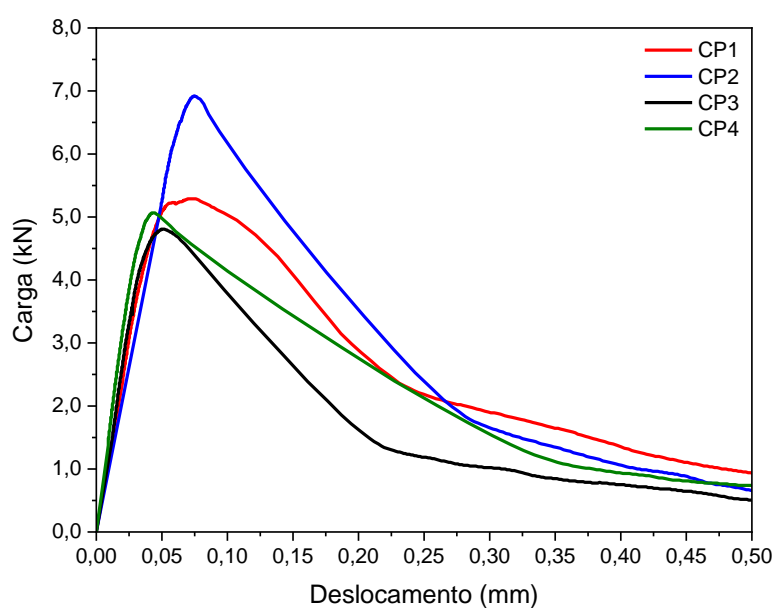
Nos ensaios de resistência à flexão em quatro pontos, os valores foram próximos da média obtida nos ensaios em três pontos, apresentando uma variação de apenas 11%, o que está alinhado com a diferença de 13% relatada na nota da UNI EN 12390-5 (2002). A resistência média alcançou 1,66 MPa, com um desvio padrão de 0,29 MPa, o que, de acordo com a norma, segue sendo considerada satisfatória para o tráfego de pedestres. No entanto, para o tráfego leve de veículos, essa resistência não atende ao requisito de ser igual ou superior a 2 MPa. Adicionalmente, os resultados obtidos apresentam valores que podem ser considerados semelhantes aos encontrados em outros estudos sobre o tema, mesmo que incluam diferentes faixas granulométricas ou variações na adição de materiais e tipos de aditivos utilizados, uma vez que a resistência à flexão dos concretos permeáveis comumente varia entre 1,4 e 3 MPa (RODRIGUES *et al.*, 2022; SANDOVAL e PIERALISI, 2023).

Além disso, foi visualizado que a amostra CP2 apresentou resistência superior às demais, embora o comportamento geral de todos os corpos de prova tenha sido semelhante. Também vale destacar que a região de linearidade das curvas carga-deslocamento foi praticamente idêntica nas quatro amostras testadas, conforme

ilustrado na Figura A.14. O módulo de elasticidade médio encontrado foi de 7,43 GPa, com um desvio padrão de 1,28 GPa.

Na configuração de quatro pontos, o módulo de elasticidade foi melhor determinado, uma vez que a instrumentação incluiu um *yoke* associado a um LVDT para a mensuração do deslocamento diretamente na amostra, eliminando as influências externas de folgas nos apoios e rigidezes dos dispositivos, fornecendo medições mais precisas.

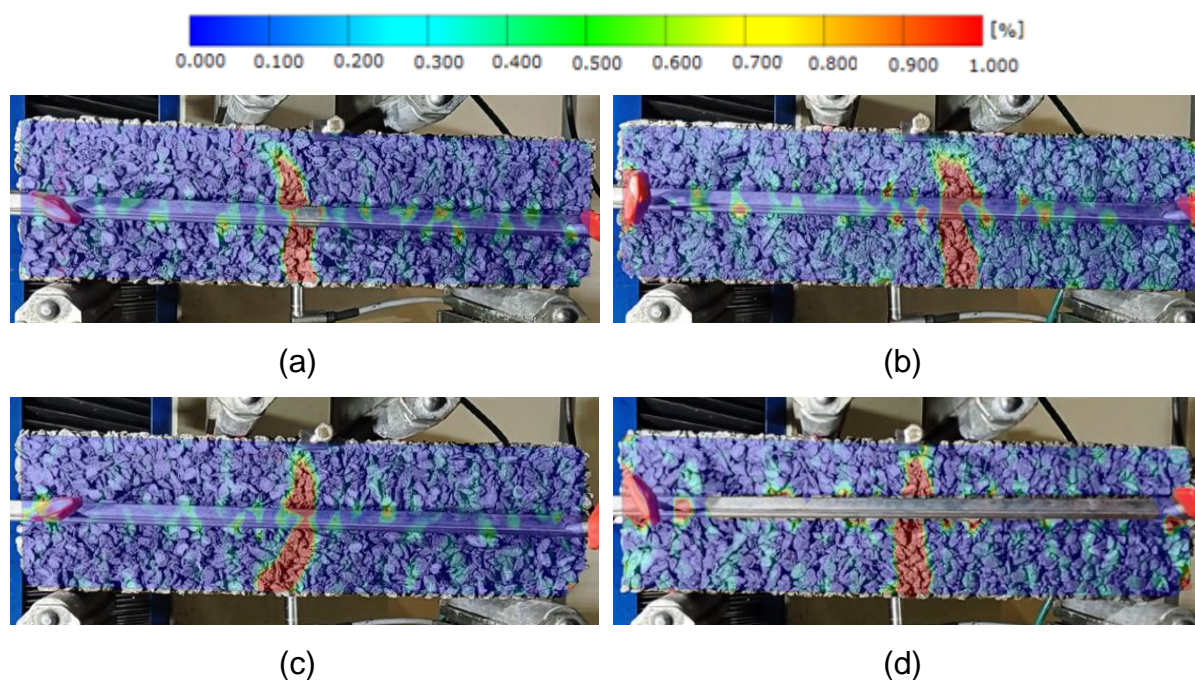
Figura A.14 - Curvas carga-deslocamento em quatro pontos.



Fonte: Elaboração própria (2025).

De acordo com a Figura A.15, no ensaio em quatro pontos, a fissura se forma no terço central da viga, propagando-se verticalmente da base ao topo. No entanto, diferentemente da configuração em três pontos, a fissuração nem sempre ocorre exatamente no centro do elemento, seguindo um trajeto mais variável.

Figura A.15 – Prismas após fratura em ensaio de tração na flexão em quatro pontos.



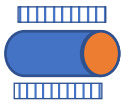
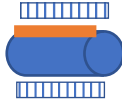
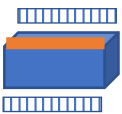




Fonte: Elaboração própria (2025).

As diferenças entre os modos de carregamento resultaram em variações na resistência à tração na flexão, condizentes com os índices normativamente esperados. Porém, o comportamento das curvas carga-deslocamento foi acentuadamente distinto entre as duas configurações e, em decorrência disso, os valores de módulo de elasticidade apresentaram grande discrepância. O módulo de elasticidade médio dos corpos de prova sujeitos ao ensaio de três pontos foi 4,7 vezes menor que aquele verificado no ensaio em quatro pontos. Essa divergência deve-se, principalmente, às variações nas condições de instrumentação implementadas, onde a configuração do ensaio em quatro pontos proporciona medições mais confiáveis da deflexão real do espécime. Em virtude dessa diferença, e em razão da norma NBR 16416 (2015) definir a configuração do ensaio de tração na flexão em quatro pontos como balizador para avaliar a capacidade de aplicação do pavimento moldado *in loco*, decidiu-se por adotá-la como padrão para o restante da campanha experimental.

A.2.6 Ensaio de tração indireta para diferentes configurações testadas

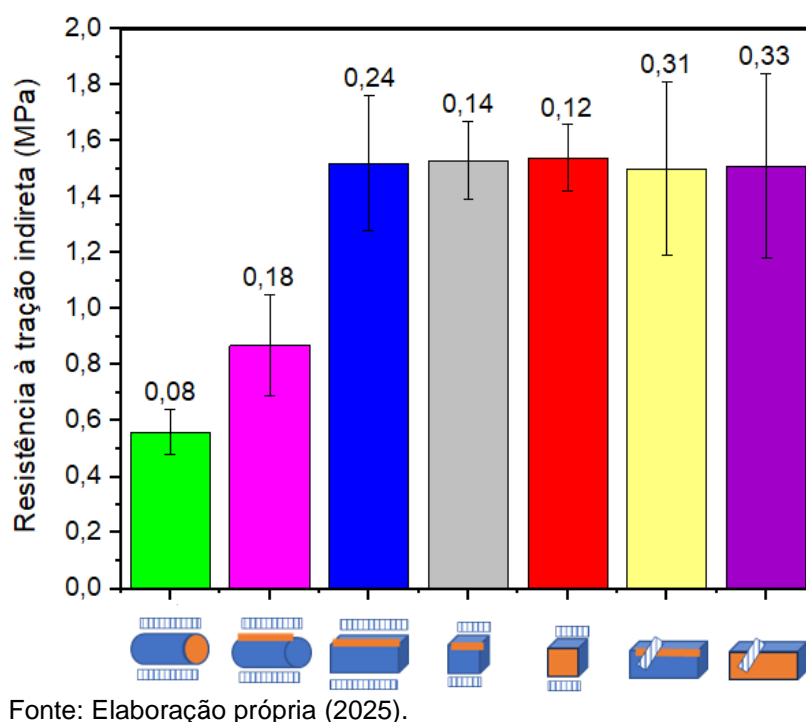
Os ensaios de tração indireta realizados nesta primeira avaliação experimental resultaram nos valores médios apresentados na Tabela A.4, os quais serviram para a construção do gráfico da Figura A.16. Lembrando que a verificação explorou diferentes normas (NBR 7222, 2011; UNI EN 12390-6, 2002; ISO 1920-4, 2020), variando tanto a orientação do carregamento dos corpos de prova em relação à direção de moldagem e compactação, quanto à forma geométrica dos elementos testados.

Tabela A.4 - Resultados médios do ensaio de tração indireta. A cor laranja indica a face onde foi realizada a compactação do corpo de prova, enquanto as linhas azuis ilustram o comprimento ao longo do qual a carga foi aplicada durante o ensaio.

Configuração de ensaio	Orientação do carregamento	Média (MPa)
Cilindros verticais		0,56±0,08
Cilindros horizontais		0,87±0,18
Prismas UNI EN		1,52±0,24
Cubos I ISO		1,53±0,14
Cubos II ISO		1,54±0,12
Prismas I ISO		1,50±0,31
Prismas II ISO		1,51±0,33

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura A.16 - Resultados do ensaio de tração indireta para diferentes configurações testadas.

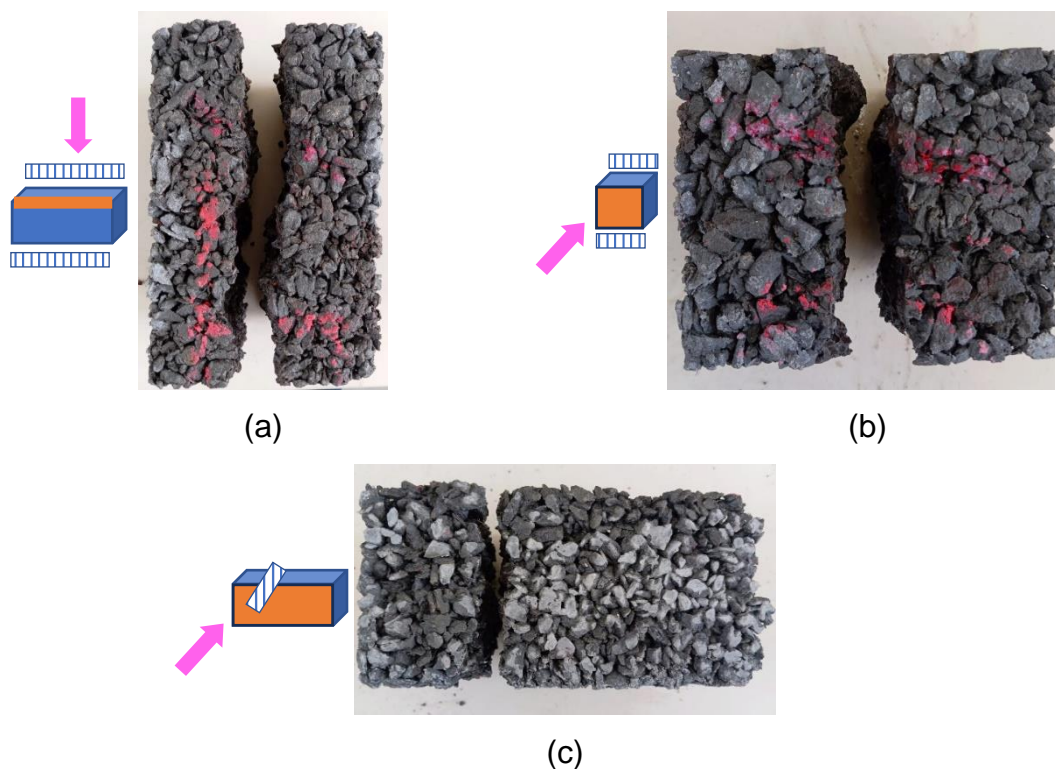


As três formas geométricas foram analisadas estatisticamente por meio de ANOVA com 95% de confiança, seguida do teste de Tukey, indicando que os cilindros diferem significativamente das outras duas geometrias que, por sua vez, não apresentam diferenças significativas entre si. No cenário proposto, onde a compactação estática é aplicada somente na camada superior dos elementos, a diferença de altura entre os corpos de prova originais pode ter influenciado os resultados. Enquanto os cilindros, independentemente da direção de extração, foram oriundos de blocos permeáveis com 200 mm de altura, as amostras cúbicas e prismáticas possuíam 100 mm de altura. Nessa situação, a altura adicional dos blocos tornou-se um fator relevante, devido à perda de intensidade da energia de compactação implementada pelo rolo à medida que penetra nas camadas inferiores. Em decorrência disso, em elementos mais altos, as propriedades mecânicas podem ser comprometidas em razão da maior fragilidade na região da base.

Além disso, a orientação do carregamento não exerceu influência significativa nos valores de resistência à tração indireta nos cubos e prismas. Em ambas as orientações de carregamento, os valores médios obtidos e o comportamento do trajeto das fissuras foram idênticos, apresentando uma fissuração semelhante à observada

no concreto convencional, com a amostra se dividindo em duas partes e exibindo uma rachadura na direção do carregamento, como mostrado na Figura A.17.

Figura A.17 - Comportamento de fissuração nas diferentes configurações do ensaio de tração indireta: (a) prisma UNI EN, (b) cubo ISO, (c) prisma ISO. A seta rosa indica a face a partir da qual a imagem está sendo visualizada.



Fonte: Elaboração própria (2025).

No entanto, nos cilindros, os elementos extraídos verticalmente apresentaram valores significativamente inferiores e trajetos de fissuração distintos daqueles observados nos espécimes horizontais. Especificamente, todos os corpos de prova cilíndricos verticais testados começaram a romper na extremidade relativa ao fundo do bloco, região menos compactada e com maior porosidade. A trinca se propagou para o lado oposto do cilindro, mas nunca alcançou a outra extremidade (Figura A.18(a)). Em contrapartida, a fratura dos cilindros extraídos horizontalmente, analogamente às demais geometrias, foi compatível com o comportamento típico de ruptura do concreto (Figura A.18(b)).

Figura A.18 - Comportamento de fissuração nas diferentes configurações do ensaio de tração indireta: (a) cilindro vertical e (b) cilindro horizontal.



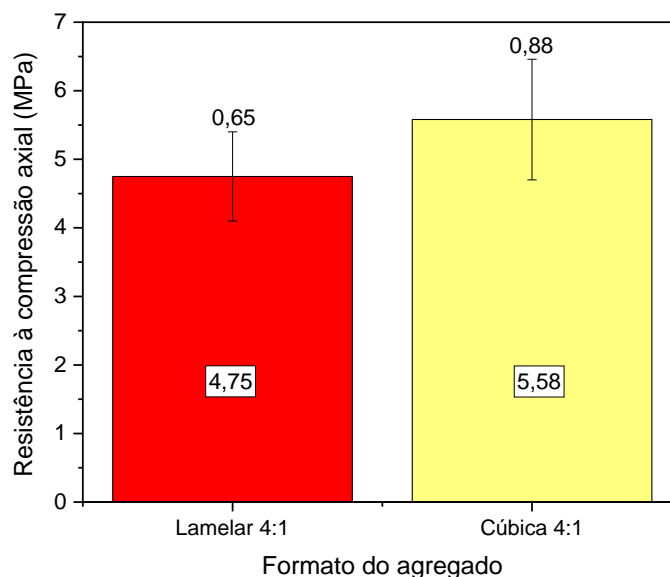
Fonte: Elaboração própria (2025).

A.2.7 Efeitos do formato do agregado graúdo

Ao final do estudo preliminar, foi investigada a influência do emprego do agregado graúdo com formato cúbico na mistura de concreto permeável, mantendo-se, inicialmente, a mesma composição de Costa *et al.* (2018), utilizada anteriormente para a brita lamelar. O objetivo foi examinar se essa alteração possibilitaria a evolução necessária das propriedades mecânicas, considerando os materiais acessíveis nas proximidades de Alegrete/RS. O gráfico da Figura A.19 compara os valores de resistência à compressão axial de amostras cúbicas aos 28 dias de idade, considerando as duas composições testadas nesta verificação: a mistura com brita de formato cúbico, na proporção de 4:1 (agregado:cimento), e o resultado previamente encontrado com a mistura com agregado lamelar.

A análise ANOVA dos resultados demonstrou que, para a mesma proporção agregado:cimento, o uso do agregado cúbico resultou em um aumento significativo da resistência à compressão axial em comparação à brita de formato lamelar. Como contraponto, ocorreu uma redução nos valores de resistência à tração. A resistência à tração na flexão em quatro pontos e a resistência à tração indireta diminuíram, respectivamente, 25,9% e 26,7% com a utilização do novo agregado, contrariando as necessidades de otimização do concreto permeável para a expansão de sua aplicabilidade.

Figura A.19 – Efeitos da forma do agregado graúdo na resistência à compressão axial do concreto permeável.



Fonte: Elaboração própria (2025).

De acordo com o estudo de Jain e Chouhan (2011), a resistência tende a aumentar com agregados mais arredondados, devido à melhor eficiência de empacotamento em relação a partículas alongadas. Todavia, na presente pesquisa, observou-se a minimização dos valores de tração, provavelmente relacionado à impossibilidade de preservar a mesma faixa granulométrica, visto que somente agregados cúbicos com dimensão máxima de 19 mm estavam disponíveis. Mesmo assim, na resistência à compressão axial, o novo agregado proporcionou aumento significativo nos resultados encontrados. Com base nisso, foi constatado que, para atingir os requisitos do material, especialmente atender a resistência à tração na flexão superior a 2 MPa para viabilizar sua aplicação em tráfego leve de veículos, seria necessário buscar outra metodologia de dosagem, compatível com as matérias-primas regionais. Entre as duas opções de agregado graúdo testadas, decidiu-se continuar os experimentos com o agregado de maior dimensão, porque além de possuir formato mais arredondado, também apresentou maior resistência, não esfarelado ao longo das passadas do rolo, diferentemente da pedra lamelar.

A.3 CONCLUSÃO

Os resultados encontrados neste apêndice orientaram a seleção dos formatos geométricos dos corpos de prova e dos procedimentos experimentais mais oportunos, pensando em facilitar o foco principal da pesquisa, conforme introduzido na subseção 3.2.1 da dissertação.

Para o ensaio de resistência à compressão axial, optou-se pela produção de cubos moldados diretamente em fôrmas de 150x150x150 mm, de acordo com as recomendações da norma UNI EN 12390-3 (2003), tendo em vista que seus resultados foram estatisticamente equivalentes aos das demais alternativas avaliadas. A escolha foi motivada por oferecer maior praticidade de execução, diminuição do tempo operacional em laboratório e menor dispersão dos resultados obtidos.

Em relação ao ensaio de tração na flexão e à consequente determinação do módulo de elasticidade, implementou-se o modo de carregamento em quatro pontos, em concordância com a norma UNI EN 12390-5 (2002). Essa configuração permitiu a instrumentação com medição direta do deslocamento na própria amostra, por meio de um *yoke* associado a um LVDT, resultando em maior precisão na estimativa do módulo de elasticidade.

Adicionalmente, as duas seções originadas dos espécimes prismáticos após a ruptura no ensaio de flexão foram reaproveitadas para a execução do ensaio de tração indireta, seguindo a norma UNI EN 12390-6 (2002). A norma ISO 1920-4 (2020) também contempla a utilização dessas seções prismáticas em suas configurações de teste. Essa reutilização contribuiu para a otimização dos processos, ao viabilizar o uso de uma mesma amostra para duas aplicações diferentes.

Quanto à taxa de infiltração de água, embora inicialmente verificada em blocos de 400x400x200 mm, optou-se por uma adaptação do procedimento para os corpos de prova cúbicos moldados, mediante a redução do diâmetro do anel de infiltração plástico, visando facilitar o manuseio do elemento durante ao ensaio. Essa decisão levou em consideração o peso elevado dos blocos, suas grandes dimensões e sua altura de 200 mm, que dificultava a transmissão eficiente da energia de compactação do rolo até a base.

Por fim, concluiu-se que o agregado de formato cúbico com dimensão máxima característica de 19 mm, apesar de ter ocasionado uma diminuição nos valores de tração, proporcionou aumento na resistência à compressão axial. Mesmo assim,

decidiu-se por sua manutenção no prosseguimento da campanha experimental, por apresentar formato mais arredondado e ser mais resistente, não se fragmentando durante a passagem do rolo compactador, ao contrário da brita lamelar.