



Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Walmeci Ferreira de Freitas Junior

**Efeito do material cimentício suplementar no comportamento do
concreto permeável para pavimentos de tráfego leve**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Belém – Pará – Brasil

2025

Walmeci Ferreira de Freitas Junior

**Efeito do material cimentício suplementar no
comportamento do concreto permeável para pavimentos
de tráfego leve**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Orientadora: Prof. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro

Belém

2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

F862e FREITAS JUNIOR, WALMECI.
Efeito do Material Cimentício Suplementar no
Comportamento do Concreto Permeável para Pavimentação
de Tráfego Leve / WALMECI FREITAS JÚNIOR. — 2025.
107 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Luciana Nazaré
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Belém, 2025.

1. Concreto Permeável. 2. Sílica Ativa. 3.
Permeabilidade. I. Título.

CDD 624

EFEITO DO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR NO COMPORTAMENTO DO CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTAÇÃO DE TRÁFEGO LEVE

AUTOR:

WALMECI FERREIRA DE FREITAS JUNIOR

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 07 / 08 / 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br LUCIANA DE NAZARE PINHEIRO CORDEIRO
Data: 26/08/2025 13:16:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Orientadora (UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br MATEUS ANTONIO NOGUEIRA OLIVEIRA
Data: 28/08/2025 10:48:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira
Membro Externo (UFMG)

Documento assinado digitalmente
gov.br ALCEBIADES NEGRAO MACEDO
Data: 27/08/2025 13:47:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macedo
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Walmecí Ferreira de Freitas Junior

Efeito do material cimentício suplementar no comportamento do concreto permeável para pavimentos de tráfego leve

Defesa de Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Belém, 07 de Agosto de 2025

Profª. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Orientadora
Universidade Federal do Pará – UFPA

Profº. Dr. Alcebíades Negrão Macedo
Examinador Interno
Universidade Federal do Pará - UFPA

Profº. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira
Examinador Externo
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Dedico a minha avó materna Benedita Pacheco Vilhena (in memoriam)

“A palavra convence, mas o exemplo arrasta.”

Confúcio (pensador e filósofo chinês)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pelo dom da vida e pela oportunidade de ter cursado o mestrado até aqui. Sem Ele, nada disso teria sido possível.

Sou profundamente grato a todo o corpo docente da Pós-graduação, em especial à professora Luciana Cordeiro, minha orientadora, pelo acompanhamento desde o início da pesquisa e pela paciência com que compartilhou seus conhecimentos. Ao professor Alcebíades Negrão, meu coorientador, agradeço o suporte nos momentos mais desafiadores, e ao professor Felipe Moreira, pelos conselhos valiosos que me acompanharam ao longo de toda a jornada acadêmica.

Aos meus pais, Walmecy Freitas e Conceição Freitas, deixo meu agradecimento mais sincero por todo o apoio e amor incondicionais ao longo desta caminhada; sem vocês, eu não seria nada. À minha irmã, Elaine Freitas, agradeço por sempre me incentivar e me fortalecer nos momentos mais difíceis.

Estendo meus agradecimentos a todos os integrantes do Laboratório de Engenharia Civil (LEC), pelo apoio na realização dos ensaios experimentais deste trabalho. Em especial, ao doutorando Nallyton Tiago, do Laboratório de Tecnologia das Construções (LABTEC), pela colaboração generosa e por compartilhar sua experiência com o concreto estudado; e à doutoranda Eloisa, por toda a assistência prestada ao longo da elaboração desta pesquisa e pelas contribuições para a preparação desta defesa. Agradeço também a todos que, mesmo não citados, foram fundamentais em diferentes momentos deste processo.

RESUMO

FREITAS JÚNIOR, W. F. Efeito do material cimentício suplementar no comportamento do concreto permeável para pavimentos de tráfego leve. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil. 2025.

A intensificação do desenvolvimento urbano tem contribuído progressivamente para a impermeabilização do solo, dificultando a infiltração da água e sobrecarregando os sistemas convencionais de drenagem. Nesse cenário, os pavimentos de concreto permeável surgem como uma solução sustentável para mitigar o escoamento superficial, favorecer a recarga do lençol freático e reduzir a ocorrência de alagamentos em áreas urbanas. No entanto, uma das principais limitações desses materiais está relacionada ao baixo desempenho mecânico e ao elevado consumo de cimento Portland necessário para garantir resistência adequada. Como alternativa, a presente pesquisa investigou os efeitos da substituição parcial do cimento por sílica ativa, um material pozolânico com potencial para otimizar a matriz cimentícia, garantindo a resistência e permeabilidade. Foram elaboradas cinco composições de concreto permeável com diferentes relações água/cimento e teores de sílica ativa, avaliadas em relação à resistência à tração na flexão e à condutividade hidráulica. As amostras foram moldadas em blocos de grandes dimensões, simulando elementos reais de pavimentação. Os resultados mostraram que o teor de 15% de sílica ativa, com relação a/c de 0,40, representa um ponto de equilíbrio entre resistência e permeabilidade, atendendo à exigência normativa para pavimentos de tráfego leve. Já a mistura com 20% de sílica e a/c de 0,30, apresentou a melhor permeabilidade, com desempenho ambiental destacado devido à redução das emissões de CO₂, embora sem atingir a resistência mínima exigida. A análise técnica foi complementada por uma avaliação de custo e impacto ambiental, com base nos dados da SEOP-PA. Conclui-se que a utilização da sílica ativa é uma estratégia viável para melhorar o desempenho ambiental do concreto permeável, desde que seus teores sejam criteriosamente definidos conforme a aplicação desejada.

Palavras-chave: Concreto permeável, Sílica ativa, Permeabilidade, tráfego leve.

ABSTRACT

FREITAS JÚNIOR, W. F. *Effect of supplementary cementitious material on the behavior of pervious concrete for light traffic pavements.* Master's Dissertation, Graduate Program in Civil Engineering, Institute of Technology, Federal University of Pará, Belém, Pará, Brazil. 2025.

The intensification of urban development has progressively contributed to soil impermeabilization, hindering water infiltration and overloading conventional drainage systems. In this context, pervious concrete pavements emerge as a sustainable solution to mitigate surface runoff, promote groundwater recharge, and reduce the occurrence of flooding in urban areas. However, one of the main limitations of these materials is related to their low mechanical performance and the high consumption of Portland cement required to ensure adequate strength. As an alternative, this research investigated the effects of partial cement replacement with silica fume, a pozzolanic material with the potential to optimize the cementitious matrix, ensuring both strength and permeability. Five pervious concrete mixtures were produced with different water-to-cement ratios and silica fume contents, evaluated in terms of flexural tensile strength and hydraulic conductivity. The samples were cast in large-scale blocks, simulating real pavement elements. The results showed that a 15% silica fume content with a water-to-cement ratio of 0.40 represents a balance point between strength and permeability, meeting the normative requirements for light traffic pavements. On the other hand, the mixture with 20% silica fume and a water-to-cement ratio of 0.30 exhibited the best permeability, with enhanced environmental performance due to reduced CO₂ emissions, although it did not reach the minimum required strength. The technical analysis was complemented by a cost and environmental impact assessment, based on data from SEOP-PA. It is concluded that the use of silica fume is a viable strategy to improve the environmental performance of pervious concrete, provided that its content is carefully defined according to the intended application.

Keywords: Pervious concrete, Silica fume, Permeability, Light traffic.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa.....	2
1.2	Objetivos	4
1.2.1	Objetivo geral	4
1.2.2	Objetivos específicos	4
1.3	Estrutura do trabalho.....	5
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	6
2.1	Sílica ativa.....	6
2.2	Concreto Permeável.....	7
2.3	Materiais	8
2.4	Porosidade	11
2.5	Permeabilidade.....	13
2.6	Comportamento mecânico do Concreto Permeável	15
2.7	Efeitos dos MCS no Concreto Permeável	17
2.8	Características gerais do Concreto Permeável.....	21
2.8.1	Permeabilidade	21
2.8.2	Porosidade.....	35
2.8.4	Resistência mecânica.....	46
2.8.6	Aplicação sustentável	52
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	58
3.1	Considerações iniciais.....	58
3.2	Materiais	59
3.2.1	Cimento e Sílica Ativa.....	59
3.2.2	Agregados.....	60
3.2.3	Água	62
3.3	Dosagem do concreto	62
3.4	Ensaios realizados	64
3.4.1	Caracterização dos materiais	64
3.4.2	Ensaio de permeabilidade.....	67
3.4.3	Ensaio de tração na flexão	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
4.1.1	Efeito MCS na permeabilidade de Concretos Permeáveis	72

4.2 Análise de viabilidade ambiental e econômica	76
5 CONCLUSÕES.....	79
5.1 Considerações.....	79
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Bloco de concreto permeável.....	2
Figura 2: Bloco de concreto convencional e concreto permeável, respectivamente.....	3
Figura 3: Produção da sílica ativa.....	6
Figura 4: Estrutura de um pavimento permeável.....	8
Figura 5: Raio X de duas amostras de PC com teor de porosidade diferentes.....	10
Figura 6: Porosidade aberta, fechada e vazios da pasta.....	11
Figura 7: Concreto impermeável x Concreto permeável.....	13
Figura 8: Representação de um permeâmetro de carga variável.....	15
Figura 9: Ensaio de compressão axial em bloco de PC.....	15
Figura 10: Ensaio de flexão em prisma de PC.....	16
Figura 11: Materiais cimentícios suplementares.....	19
Figura 12: Compactação nos moldes e ensaio com permeâmetro de carga variável, respectivamente.....	23
Figura 13: Relação entre a taxa de infiltração e a porcentagem real de vazios.....	24
Figura 14: Efeito da quantidade e qualidade da pasta na resistência à flexão do concreto aos 28 dias.....	24
Figura 15: Relação entre a resistência à flexão aos 28 dias e a porcentagem real de vazios ..	25
Figura 16: CPs do traço com relação a/c de 0,45, com poros obstruídos.....	37
Figura 17: Aspecto visual de corpo de prova extraído de bloco de concreto e corpo de prova moldado, respectivamente.....	37
Figura 18: Aparelho construído para medição da condutividade hidráulica das amostras de concreto permeável.....	39
Figura 19: Efeitos da forma de vibração na resistência à compressão de traços com $m=4$ e brita 1 com adição de 7% de areia.....	41
Figura 20: Desempenho reológico para amostras de pasta contendo várias quantidades de sílica ativa.....	43
Figura 21: Impacto no teor de vazios da sílica ativa para misturas produzidas usando agregados de rio arredondados.....	44
Figura 22: Produto de cascalho de rio PCPC após 500 revoluções.....	45
Figura 23: Superfície de fratura típica pelo microscópio óptico.....	46
Figura 24: Ruptura à tração indireta e seção de fratura de concreto com duas camadas de compactação.....	47
Figura 25: Ruptura à tração indireta e seção de fratura de concreto com três camadas de compactação.....	48
Figura 26: Ensaio de consistência.....	51
Figura 27: Dispositivo de compactação e amostra de concreto permeável.....	27
Figura 28: Dispositivo de permeabilidade para concreto permeável.....	27
Figura 29: Modelo tridimensional de concreto permeável.....	27
Figura 30: Coeficiente de permeabilidade para diferentes porosidades.....	29
Figura 31: Modelo de rede de poros equivalente.....	30
Figura 32: Distribuição do tamanho dos poros 3D.....	31
Figura 33: Distribuição da área da garganta 3D.....	32

Figura 34: Distribuição do comprimento da garganta 3D	33
Figura 35: Linhas de via de infiltração de concreto permeável.....	34
Figura 36: Linhas de via de infiltração local de concreto permeável.....	35
Figura 37: Componentes da matriz dos RPCs em estudo: (a) 3/4" RCA; (b) 3/8" RCA; (c) Cimento CPC30R; (d) 3/4" RAP; (e) 3/8" RAP; (f) Areia de sílica menor que a peneira nº 0.	
.....	52
Figura 38: Protótipo de permeâmetro desenvolvido para teste de permeabilidade.....	55
Figura 39 Misturas de RPC selecionadas para o estudo de TGA. (a) M1 3/8"; (b) M4 3/8"; (c) M5 3/8"; (d) M7 3/8"; (e) M1 3/4"; (f) M4 3/4"; (g) M5 3/4"; (h) M8 3/4".....	55
Figura 40: ITZ das amostras RPC estudadas por Microscopia Eletrônica de Varredura. (a) M4 3/8"; (b) M5 3/8"; (c) M4 3/4"; (d) M5 3/4".	56
Figura 41: Fluxograma das atividades experimental	58
Figura 42: Dimensões dos blocos.....	59
Figura 43: Distribuição granulométrica da sílica ativa utilizada.....	60
Figura 44: Sílica ativa.....	60
Figura 45: Seixo médio utilizado.....	61
Figura 46: Mistura do traço CPER30SA5.....	62
Figura 47: Lançamento e adensamento com uso de rolo metálico em CP, respectivamente ..	63
Figura 48: Processo de cura dos blocos.....	64
Figura 49: Ensaio de granulometria – a) peneirador adotado; b) material passante na peneira # 9,5 mm,.....	65
Figura 50: Ensaio de massa específica – a) cimento e b) sílica ativa.....	66
Figura 51: Gráfico de contagem em função do ângulo de difração.....	67
Figura 52: Permeâmetro para carga variável	68
Figura 53: Procedimento para medição do desempenho hidráulico.....	69
Figura 54: Prisma para ensaio de tração na flexão.	70
Figura 55: Prisma rompido após o ensaio.	70
Figura 56: Resultados de permeabilidade do concreto (a) família 0,40 e (b) família 0,30.	72
Figura 57:RTF Média Comparada à NBR 16416.....	74
Figura 58: relação entre RTF x K1.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Consumo de materiais na produção de concreto permeável.....	9
Tabela 2: Coeficiente de permeabilidade.	14
Tabela 3: Requisitos de resistência de pavimentos permeáveis.	17
Tabela 4: Quantitativos obtidos por autores e características dos MCS.....	20
Tabela 5: Dosagem de concreto poroso.....	23
Tabela 6: Volume de pasta associado a dosagem ótima de cimento.....	25
Tabela 7: Traços do concreto da etapa 1 da pesquisa.	38
Tabela 8: Traços do concreto da etapa 2 da pesquisa.	39
Tabela 9: Resultados de resistência à compressão axial de corpos de prova moldados com brita 1, brita 0 e brita 1 mais 7% de areia.	40
Tabela 10: Caracterização dos agregados graúdos utilizados por Mikami (2022).	49
Tabela 11: Proporção da mistura do concreto permeável (kg/m ³).....	26
Tabela 12: Porosidade do concreto permeável.	28
Tabela 13: Resistência à compressão do concreto permeável.	29
Tabela 14: Comparaçao de resultados de porosidade experimental e simulados.....	30
Tabela 15: Comparaçao de resultados de porosidade experimental e simulados.....	34
Tabela 16: Propriedades físico-mecânicas do RA usado para as diferentes misturas de RPC.	53
Tabela 17: Projeto de misturas.	53
Tabela 18: Composição dos diferentes materiais para mistura do RPC.....	54
Tabela 19: Propriedades físicas e químicas do cimento CP II F 32.	59
Tabela 20: Distribuição granulométrica do seixo médio.....	61
Tabela 21: Traços utilizados na pesquisa.	63
Tabela 22: Distribuição granulométrica do agregado graúdo.	65
Tabela 23: Consumo energético dos traços desenvolvidos.	76
Tabela 24: Custo por m ³ das misturas apresentadas.	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características granulométricas analisadas. 49

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- MCS** - Materiais cimentícios suplementares
- ABNT** - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ACI** - Instituto Americano de Concreto
- VDM** - Volume diário médio
- ASTM** - American Society for Testing and Materials
- IACV** - Inventário de Avaliação do Ciclo de Vida
- CP** - Corpo de Prova
- A/C** - Relação água e cimento
- K** - Coeficiente de Permeabilidade
- RTF** - Resistência de tração a flexão
- CCA** - Cinza de Casca de Arroz
- CP** - Cimento Portland
- SA** - Sílica Ativa

1 INTRODUÇÃO

O crescimento das populações urbanas, atrelado à precarização das políticas de infraestrutura e urbanização das cidades, acarreta severas interferências nos sistemas naturais de drenagem, através de obras de infraestrutura para canalização de córregos e processos de substituição de camadas drenantes naturais por estruturas de concreto e asfalto, que resultam em maior incidência de fenômenos associados a enchentes e inundações. Isso ocorre porque o desenvolvimento de alto impacto nas áreas de infraestrutura de transporte pela construção de pavimentos convencionais impermeáveis está transformando coberturas permeáveis naturais em coberturas que dificultam a filtragem de águas superficiais para o subsolo (Chandrappa; Biligiri, 2016; Tucci, 2002; Yang; Giang, 2003). A Figura 1 mostra uma situação de alagamento após intensas chuvas em Belém – PA.

Figura 1: Alagamento em rua em Belém - PA



Fonte: O Liberal, disponível em https://www.oliberal.com/belem/alagamentos-voltam-a-causar-transtornos-em-belem-apos-chuva-neste-domingo-15-1.249403#google_vignette, acessado em 19 de agosto de 2025.

O potencial interesse no uso de pavimentos de concreto permeável é associado à capacidade desse tipo de tecnologia em mitigar desastres urbanos associados a alagamentos. Destaca-se que esse tipo de pavimentação é considerado como tecnologia de baixo impacto ambiental ou ainda sistema de drenagem verde, sendo utilizado para mitigar os efeitos da urbanização sobre a permeabilidade natural dos sistemas ambientais das cidades. Em comparação às tecnologias tradicionais ou infraestrutura cinza, as tecnologias de baixo impacto ambiental possibilitam o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis, adaptáveis e resilientes

a variações climáticas ou dos sistemas urbanos (Ahern, 2011; Ahiablame *et al.*, 2012; Butler *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2017; Xie *et al.*, 2019).

Tucci (2002) destaca que a gestão pública de recursos hídricos não atua de modo eficaz na prevenção de impactos associados a inundações e alagamentos, resultando em perdas materiais e humanas, interrupção da atividade econômica nas áreas afetadas, além de contaminação por doenças de veiculação hídrica, como leptospirose e cólera. Para autores como Peng *et al.* (2019) e Zhong *et al.* (2018), isto resulta na crescente demanda de ações integradas para o desenvolvimento de infraestruturas de drenagem e manejo de águas pluviais que possam proporcionar cidades mais sustentáveis e resilientes, com capacidade para absorver, armazenar e distribuir águas superficiais.

1.1 Justificativa

Sob essa perspectiva, surge a demanda por tecnologias de drenagem alternativas, dentre as quais se destaca o uso de pavimentos de concreto permeável (Figura 2). Haselbach *et al.* (2006) define que este sistema é uma superfície de pavimentação que pode ser usada para reduzir os efeitos da poluição de fonte não pontual do escoamento de águas pluviais de superfícies pavimentadas, como estradas e estacionamentos, permitindo que parte da chuva penetre no solo abaixo. Li *et al.* (2019) destacam que a utilização desse material permite a percolação de ar e água, ocasionando também uma rápida filtragem dessas águas, logo, possibilitando que recursos hídricos subterrâneos sejam renovados em um menor tempo.

Figura 2: Bloco de concreto permeável.



Fonte: Mikami (2022).

A matriz porosa do concreto permeável apresenta capacidade térmica de absorção e armazenamento de calor, contribuindo para a mitigação do fenômeno de ilhas de calor urbanas, ao favorecer o intercâmbio térmico com o ambiente e reduzir a retenção de calor superficial observada em pavimentos convencionais. De acordo com a norma americana ACI 522R (2010), o concreto permeável é definido como um material granular graduado com estrutura porosa, caracterizada pela presença de poros interconectados, sem saída e capilares. Em sua composição, utilizam-se predominantemente agregados graúdos de granulometria uniforme ou de mistura binária, associados a uma quantidade otimizada de cimento, suficiente para revestir e ligar os agregados, sem comprometer a porosidade. Segundo a NRMCA – CIP-38 (2004), essa porosidade varia entre 15% e 25%, enquanto a relação água-cimento geralmente se mantém inferior àquela adotada em concretos convencionais, situando-se na faixa de 0,28 a 0,40.

De acordo com Chandrappa & Biligiri (2016), a proporção de agregado para cimento tem variado, em massa, na faixa de 4:1 até 6:1. Normalmente, o volume de agregados no concreto permeável é em torno de 50 a 65% em comparação com o concreto convencional, que é de cerca de 60 a 75%. A Figura 3 mostra uma comparação entre um bloco de concreto convencional e um de concreto permeável. Também é importante ressaltar que a seleção e proporção dos materiais usados no concreto permeável deve ser cuidadosamente considerada para evitar a formação de poros excessivamente grandes que possam comprometer a resistência e durabilidade do material.

Figura 3: Bloco de concreto convencional e concreto permeável, respectivamente.



Fonte: Adaptado de Simões *et al.* (2023).

As propriedades dos aglomerantes cimentícios exercem influência significativa sobre o desempenho do concreto permeável. Nesse contexto, é comum a utilização de cimentos com

alta resistência inicial, bem como de aditivos retardadores, que têm como objetivo evitar a segregação dos agregados e proporcionar tempo adequado para a compactação da mistura, favorecendo, assim, o desenvolvimento de concretos com melhor desempenho mecânico. Segundo a ACI 522R (2010), essas práticas são recomendadas para garantir a integridade estrutural e a funcionalidade hidráulica do material.

Além disso, considera-se o uso de materiais cimentícios suplementares (MCS), como cinza volante, escória de alto-forno e sílica ativa. Segundo Santos *et al.* (2014), esses materiais possuem propriedades pozolânicas que podem contribuir significativamente para o aumento da resistência à compressão e para a durabilidade do concreto permeável. Ainda conforme a ACI 522R (2010), esses materiais atuam sobre a microestrutura da matriz cimentícia, promovendo a refinação dos poros e a redução de sua conectividade, o que impacta positivamente nas propriedades mecânicas e na vida útil do material. Dessa forma, a incorporação de aglomerantes e MCS afeta diretamente parâmetros como porosidade, resistência à compressão, resistência à tração, permeabilidade e durabilidade do concreto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o efeito da sílica ativa no desempenho do concreto permeável para pavimentos de tráfego leve, através de parâmetros técnicos no estado fresco e endurecido.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivo tem-se:

- Avaliar o efeito do teor de substituição de sílica ativa no comportamento mecânico e hidráulico dos concretos permeáveis;
- Avaliar o efeito da natureza (química e/ou física) da incorporação de sílica ativa no comportamento mecânico e hidráulico de concretos permeáveis;
- Avaliar a potencialidade do uso de MCS na redução do consumo de cimento em concretos permeáveis;
- Analisar os impactos ambientais e econômicos da incorporação de MCS em concretos permeáveis.

1.3 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos mais as referências bibliográficas. No *capítulo 1* faz-se a introdução da pesquisa, a justificativa, os objetivos e a estrutura da pesquisa.

No *capítulo 2* é apresentado uma breve definição de concreto permeável e fatores influentes. Além disso, consta a revisão bibliográfica que reúne referências de trabalhos experimentais realizados por autores, assim, embasando o presente trabalho.

O *capítulo 3* apresenta o programa experimental desenvolvido, descrevendo as características geométricas das peças, bem como os traços desenvolvidos e os ensaios realizados.

No *capítulo 4* consta os resultados do programa experimental, com os gráficos das resistências das misturas obtidas.

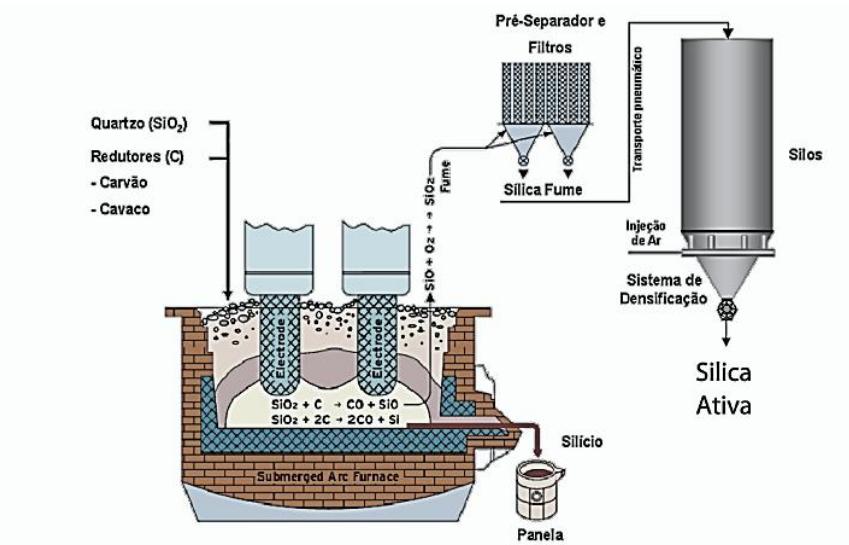
No *capítulo 5* são apresentadas as conclusões obtidas desse estudo e sugestões para trabalhos futuro.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Sílica ativa

A sílica ativa é um material pozolânico amplamente utilizado na produção de concretos de alto desempenho devido à sua elevada reatividade. Trata-se de um subproduto ultrafino da fabricação do silício metálico ou de ligas de ferro-silício em fornos elétricos, sendo composta, majoritariamente, por dióxido de silício (SiO_2) em forma amorfa. Esse resíduo industrial, ao ser incorporado ao cimento Portland, proporciona benefícios tanto no estado fresco quanto endurecido do concreto, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental ao reduzir a necessidade de cimento, cuja produção é altamente emissora de CO_2 . A Figura 4 mostra o processo de produção desse resíduo industrial.

Figura 4: Produção da sílica ativa.



Fonte: Guimarães (2014).

Diversos estudos indicam que a adição de sílica ativa melhora significativamente propriedades mecânicas e de durabilidade dos compósitos cimentícios. De acordo com Seidenstucker *et al.* (2019), essa adição resulta em maiores resistências à compressão, devido à formação secundária de produtos de hidratação que densificam a matriz do concreto. Além disso, autores como Nazeer *et al.* (2023) destacam a influência positiva da sílica ativa em concretos permeáveis, especialmente quando combinada com outras adições minerais, como cinzas volantes, resultando em materiais com maior resistência e vida útil prolongada, mesmo em ambientes agressivos.

No que se refere à durabilidade, pesquisas como as de Cardoso *et al.* (2017) e Bigotto (2021) mostram que a substituição parcial do cimento por sílica ativa reduz a porosidade do concreto, o que dificulta a penetração de agentes agressivos como dióxido de carbono e íons cloreto, evitando assim o aparecimento de fissuras, desagregações e, consequentemente, a perda da capacidade estrutural do piso ao longo do tempo. Tal comportamento é atribuído à reação pozolânica entre a sílica e o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, formando compostos mais estáveis e com menor permeabilidade. Em argamassas e concretos, isso se traduz em maior resistência a processos de corrosão e degradação por carbonatação.

Por fim, além dos benefícios técnicos, a incorporação da sílica ativa também representa uma estratégia ambientalmente vantajosa. Como destacado por Brasileiro (2023), o aproveitamento de subprodutos industriais, como a sílica ativa, permite reduzir o consumo de recursos naturais não renováveis e diminuir a emissão de gases do efeito estufa associados à produção de cimento. Assim, sua utilização se alinha aos princípios de sustentabilidade e economia circular na construção civil, promovendo práticas mais ecológicas e eficientes.

2.2 Concreto Permeável

Diante das possibilidades e devido à estrutura porosa da matriz de concreto, a tecnologia de pavimentação drenante de concreto permeável é utilizada em diversos contextos, especialmente em países europeus e nos Estados Unidos. Há registros do uso do material inicialmente na França, que utilizou a pavimentação permeável notadamente na década de 1940, após o fim da 2^a Guerra Mundial e em contexto de baixa disponibilidade de matérias-primas para reconstrução dos países afetados pela guerra. A partir da década de 1970, países como o Japão, Estados Unidos e Suécia iniciaram estudos com o intuito de usar essa tecnologia para aplicá-la em pequena escala (Virgilis, 2009).

De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015), a camada de revestimento para pavimento é uma estrutura construída após a terraplanagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto, a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos de veículos, melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança e resistir aos esforços horizontais que nela atuam tornando mais durável a superfície de rolamento. Nesse sentido, a norma brasileira aborda que a pavimentação drenante de concreto permeável é caracterizada por ser composta por uma matriz de concreto com vazios interligados que permitem a

percolação de água por ação da gravidade. A Figura 5 mostra as camadas formadas para um pavimento permeável.

Figura 5: Estrutura de um pavimento permeável.



Fonte: Adaptado de Chandrappa *et al.* (2016).

Para Balbo (2020), a principal característica de um pavimento de concreto permeável é ser uma estrutura superficial porosa que direciona a água da chuva para uma base granular que pode armazenar parte da água percolada por seus vazios e/ou direcionar uma parte para o subleito da camada. Ainda segundo a norma brasileira, o pavimento de concreto permeável é destinado preferencialmente ao uso de pedestres, com possibilidade de uso em vias de tráfego de veículos leves, com volume diário médio (VDM) de até 400, podendo existir ocasionalmente o tráfego de ônibus e caminhões em número não superior a um VDM de 20.

A normativa americana (ACI 522R-10, 2010) aborda diversas vantagens do uso de pavimentos de concreto permeável, como o controle de poluição em águas superficiais, o controle do escoamento de águas pluviais e a redução da derrapagem em vias. Como principais empecilhos para ampla utilização da tecnologia de concretos permeáveis, há, entre outros, a necessidade de elevado controle tecnológico, o que demanda mão-de-obra especializada, o maior custo de implantação e baixa resistência mecânica dos pavimentos, o que limita sua utilização a vias de tráfego de veículos leves.

2.3 Materiais

Segundo Chandrappa & Biligiri (2016), o concreto permeável é composto de cimento Portland, agregado graúdo cuja proporção cimento/agregado variam em massa de 1:4 a 1:6, podendo também ser composto por agregados miúdos com o objetivo de elevar a sua resistência, além de aditivos plastificantes, retardadores de pega e incorporadores de ar, em

casos de aplicação em locais sujeitos a ação de gelo e degelo para o aumento de sua durabilidade. Na Tabela 1 é possível verificar o que o ACI utiliza comumente na produção do concreto permeável.

Tabela 1: Consumo de materiais na produção de concreto permeável.

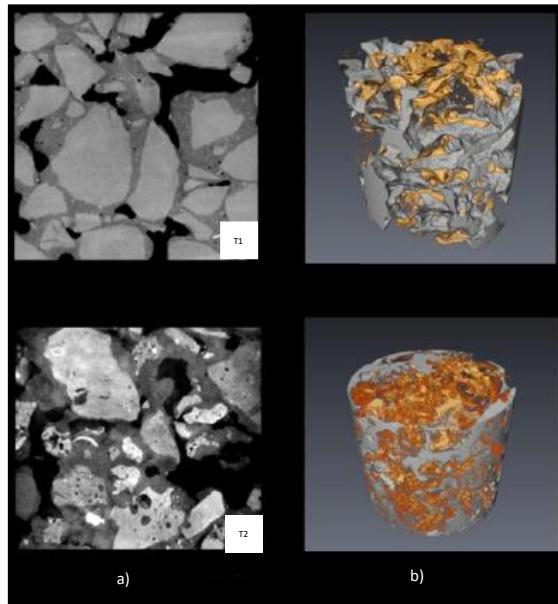
Materiais	Proporções
Cimento	270 - 475 kg/m ³
Agregado	1190 - 1480 kg/m ³
Relação água/cimento	0,27 - 0,34

Fonte: Adaptado de ACI 522R (2010).

Em relação aos agregados graúdos utilizados, a normativa americana estabelece o uso de materiais com diâmetro característico entre 9,5 e 19 mm. A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) C33, por sua vez, recomenda o uso de agregados com diâmetro característico entre 1,18 e 19 mm. A normativa brasileira, por sua vez, recomenda o uso de agregados de granulometria aberta, ou seja, com predominância de um mesmo tamanho de partícula, com pouco ou nenhum fino, e a predominância de agregados graúdos com diâmetro característico entre 4,75 e 9,5 mm.

A relevância da adequada distribuição granulométrica reside em ser esse um dos fatores preponderantes para a porosidade da matriz de concreto, que conferirá as principais propriedades do material. Em um estudo relacionado, Ćosić *et al.* (2015) abordaram que as características dos poros do concreto permeável (PC – *Pervious concrete*) são mais influenciadas pelo tipo de agregado do que pelo tamanho dos grãos. A Figura 6 mostra a micro tomografia de raios X de duas amostras (T1 e T2) com diferentes composições: (a) seção detalhada no plano XZ; (b) visualização tridimensional da morfologia dos poros. As regiões em cinza representam espaços porosos conectados, enquanto as áreas em amarelo indicam poros isolados.

Figura 6: Raio X de duas amostras de PC com teor de porosidade diferentes.



Fonte: Adaptado de Ćosić *et al.* (2015).

Neptune & Putman (2010), por sua vez, afirmam que conforme a gradação das misturas tornou-se menos uniforme, ou seja, utilizou-se uma maior distribuição granulométrica, a permeabilidade e porosidade das matrizes de concreto diminuiu e a resistência mecânica aumentou. Isso ocorreu porque a presença de grãos menores preencheu os vazios entre os grãos maiores e reduziu os poros da matriz de concreto, além de aumentar o empacotamento dos grãos, propiciando maiores resistências às misturas. Esses resultados são compatíveis com o que foi observado por Yang & Jiang (2003), que concluíram, em estudo predecessor, que a redução do diâmetro dos agregados possibilitou a obtenção de misturas com menor porosidade e maiores resistências.

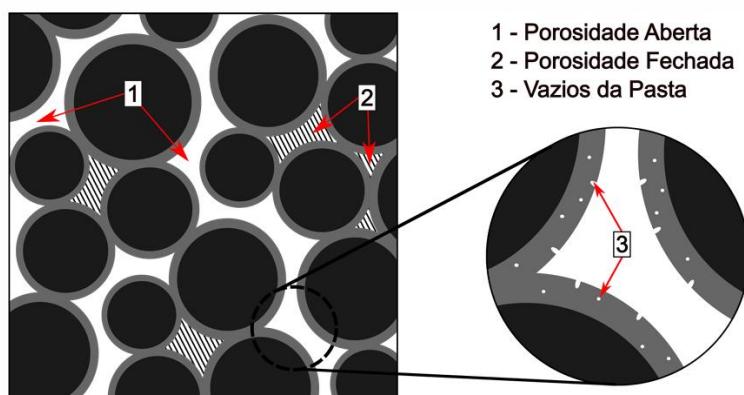
A norma americana (ACI 522R-10) instrui que o uso de materiais cimentícios, como cinza volante e escória de alto forno, podem ser utilizados na mistura do concreto permeável, no entanto a norma não limita o teor a ser utilizado. Chen *et al.* (2019) explica que a substituição do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares como escória e cinzas volantes, tem tido vasta adesão nos últimos anos como forma de redução aos impactos ambientais causados pelas indústrias cimenteiras. Mohammed *et al.* (2018) estudaram as propriedades do concreto permeável utilizando cinzas volantes na substituição parcial do cimento e nano-sílica como aditivo. Os resultados apontaram que houve um aumento na resistência à compressão do material, não reduzindo a sua porosidade e até melhorando também a permeabilidade, principal característica do concreto permeável.

O estudo feito por Yang (2011), por sua vez, mostrou que a adição de sílica ativa e fibras de polipropileno melhoram a durabilidade de congelamento e descongelamento do concreto permeável. Zhong *et al.* (2018) destacam que a resistência do concreto permeável pode ser aumentada por meio da incorporação de uma pequena quantidade de areia fina e/ou mistura de látex, pois esses componentes proporcionam uma melhoria na ligação entre as partículas dos agregados. Com relação a pavimentos de concreto permeável, Yang & Jiang (2003) indicam que a adição de materiais complementares nas misturas, como sílica ativa e polímeros, são capazes de melhorar significativamente as resistências dos pavimentos de concreto permeável.

2.4 Porosidade

A porosidade do concreto permeável pode ser classificada em três categorias: efetiva, isolada e total. A porosidade efetiva corresponde ao volume de vazios interconectados em relação ao volume total da amostra, sendo a porção responsável pela permeabilidade do material. Já a porosidade isolada representa os poros que não se conectam entre si nem com a superfície externa, calculada pela razão entre os vazios isolados e o volume total. Por fim, a porosidade total é obtida pela soma dos volumes de poros conectados e isolados. Vale destacar que a porosidade não depende apenas da quantidade de vazios, mas também da sua distribuição espacial e do grau de interconectividade entre os poros. A Figura 7 ilustra esses diferentes tipos de porosidade.

Figura 7: Porosidade aberta, fechada e vazios da pasta.



Fonte: Mikami (2022).

Para Zhong *et al.* (2018), o concreto permeável possui vazios que podem não ser eficientes para o fluxo de fluidos, devido à existência de poros isolados em sua estrutura interna. O volume de poros conectados no concreto permeável varia, tipicamente, na faixa de 15-35%,

suficiente para facilitar o fluxo de água através da camada de pavimento (Tennis *et al.*, 2004; ACI, 2010; Yahia; Kabagire, 2014). Portanto, a estrutura de poros do concreto permeável, referente à tortuosidade e dimensão, acaba por se tornar mais complexa devido à dependência dos tipos de materiais e métodos empregados na dosagem e produção desse material.

Montes *et al.* (2005) afirmam que normalmente, a água flui através de uma camada de concreto permeável com taxas de 0,2 cm/s a mais de 1 cm/s, dependendo dos materiais. Os autores apontam também que essa taxa é maior do que a maioria das taxas de precipitação, e a superfície de concreto permeável é muitas vezes projetada para lidar com a chuva direta (escoamento passivo). Rushton (2001) avaliou a capacidade de infiltração e a concentração de poluentes em propostas de drenagem para um estacionamento aberto. Resultados preliminares do estudo de 2 anos apontaram que para uma carga pluviométrica média de 72 mm, houve redução em até 45% do escoamento superficial pelo uso de pavimentação permeável.

Em estudo similar para avaliação da redução do escoamento superficial e concentração de poluentes, Dreelin *et al.* (2006) observaram redução de até 93% do escoamento superficial para chuvas de baixa intensidade. Ambos os estudos, apesar de não caracterizarem especificamente os poros das camadas drenantes, destacaram a relevância desses para a potencial percolação de fluídos nas matrizes de concreto. Kwiatkowski *et al.* (2007) citou a porosidade de até 25% observada em pavimentos de concreto permeável e destacou que foi possível reduzir até 100% do escoamento superficial na área analisada em seu estudo por conta da elevada porosidade dos pavimentos drenantes utilizados.

Alam *et al.* (2019), por sua vez, compararam diferentes tipos de pavimento permeável para redução de escoamento superficial. Os autores observaram que a utilização de cobertura drenante de concreto com 20% de porosidade possibilitou a redução de até 98% do escoamento superficial para taxas pluviométricas médias de 70 mm. Em estudo que simulou a realidade pluviométrica da região amazônica, Braga *et al.* (2022) observaram escoamento superficial inferior a 0,5% para ocorrência de chuvas intensas, com duração de até 15 minutos, em placas de concreto permeável com porosidade variando entre 21 e 39%. Os autores também observaram relação inversa entre o escoamento superficial e a área dos poros superficiais das misturas analisadas.

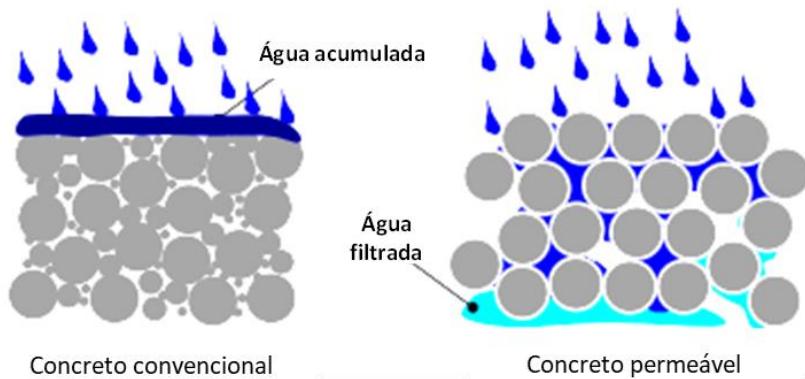
Em outro estudo, Rodrigues *et al.* (2022) verificou que a porosidade efetiva da matriz de concreto é fortemente correlacionada positivamente com a permeabilidade – ou seja, quanto maior a porosidade efetiva, maior o coeficiente de permeabilidade da camada drenante. A permeabilidade também foi correlacionada com o diâmetro dos poros superficiais, assim como

a redução do escoamento superficial observado no estudo de Braga *et al.* (2022). Rodrigues *et al.* (2022) observaram ainda a correlação entre diâmetro e número de poros superficiais com a absorção sonora em frequências de 500 a 1600 Hz, intervalo de frequência associado com o ruído de motores e fricção entre pneus e pavimento em vias.

2.5 Permeabilidade

Zhong *et al.* (2018) definem a permeabilidade como a capacidade do concreto permeável em drenar a água, através dos poros interconectados dentro da sua estrutura, como pode ser visto na Figura 8. Collishonn & Tassi (2008) acrescentam que a infiltração é diretamente influenciada pela condutividade hidráulica do material, ou seja, por sua permeabilidade. A permeabilidade é quantificada pela definição do coeficiente de permeabilidade (k), que é um parâmetro utilizado para mensurar a velocidade que uma determinada quantidade de água percola um material permeável, devendo ser maior que 1 mm/s. (ABNT 16416, 2015). Segundo o ACI 522R (ACI, 2010), os valores recomendados variam entre 1,4 mm/s e 12,2 mm/s.

Figura 8: Concreto convencional x Concreto permeável.



Fonte: Adaptado de Zhong *et al.* (2018).

Na Tabela 2 é possível analisar os resultados do coeficiente de permeabilidade máximo e mínimo obtido por alguns autores. Na prática, a permeabilidade é um parâmetro fundamental para estimar o desempenho do pavimento permeável em relação à absorção de águas pluviais e à redução do escoamento superficial. Em estudo abordando materiais, Braga *et al.* (2022) observaram que o coeficiente de permeabilidade se correlacionou diretamente à capacidade de placas de concreto permeável em reduzir o escoamento superficial. Além disso, os autores destacam que variações nos materiais utilizados, como o tipo de agregado e o teor de pasta,

influenciam significativamente os valores de permeabilidade obtidos. Outros estudos também apontam que fatores como a compactação e a manutenção das superfícies são determinantes para garantir a eficiência hidráulica ao longo do tempo, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Coeficiente de permeabilidade.

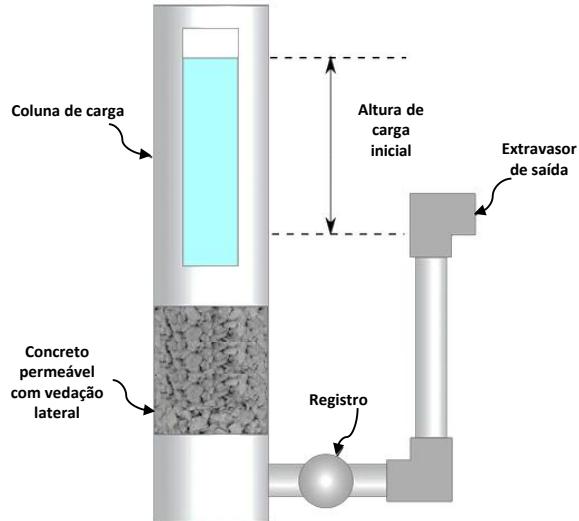
Referência	Coeficiente de permeabilidade (mm/s)
Carl (2018)	4,1 – 18,0
Costa <i>et al.</i> (2018)	8,4 – 20,8
Mikami <i>et al.</i> (2018)	8,20 – 9,5
Chen <i>et al.</i> (2019)	0,45 – 0,58
Braga <i>et al.</i> (2022)	1,19 – 9,5

Fonte: Autor (2025).

Um dos principais desafios no desenvolvimento de misturas de concreto permeável está em obter equilíbrio entre o desempenho mecânico e a capacidade de percolação de fluidos. Nesse sentido, Yahia & Kabagire (2014) desenvolveram um estudo com o objetivo de avaliar a influência da graduação e diâmetro característico dos agregados, bem como o volume de pasta de cimento, sobre propriedades de concretos permeáveis. Em relação à permeabilidade, os autores observaram que a maior graduação dos grãos e a redução do diâmetro característico reduziu o potencial de percolação de fluidos nas matrizes de concreto, havendo, nesse sentido, relação polinomial entre o coeficiente de permeabilidade e a porosidade dos concretos.

Mikami (2022) realizou uma pesquisa onde a condutividade hidráulica do concreto permeável foi avaliada por meio de ensaios com permeômetro de carga variável (ver Figura 9), utilizando uma carga inicial de 500 mm. Esse método permitiu medir a taxa de escoamento da água através das amostras, possibilitando o cálculo da condutividade hidráulica com base na variação do nível de água ao longo do tempo. O autor analisou como diferentes parâmetros de dosagem e propriedades dos agregados influenciam a permeabilidade do material. A análise mostrou que o equilíbrio entre porosidade e distribuição granulométrica é fundamental para o desempenho hidráulico do concreto. O modelo de regressão proposto demonstrou ser eficaz na estimativa da condutividade hidráulica com base em características físicas do material.

Figura 9: Representação de um permeâmetro de carga variável.



Fonte: Adaptado de Mikami (2022).

2.6 Comportamento mecânico do Concreto Permeável

Para garantir a funcionalidade desse tipo de concreto, é necessário analisar a sua aplicação e influência diretamente na durabilidade do material. Segundo Chandrappa & Biligiri (2016), as principais propriedades mecânicas que devem ser avaliadas no pavimento de concreto permeável são: resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à fadiga, abrasão e resistência ao congelamento e degelo. Além disso, por apresentar uma matriz porosa, o concreto permeável acaba tendo o seu desempenho mecânico diretamente afetado. A Figura 10 mostra um bloco de concreto permeável sendo submetido ao ensaio de compressão, enquanto a Figura 11 apresenta um prisma, do mesmo material, submetido ao ensaio de tração na flexão.

Figura 10: Ensaio de compressão axial em bloco de PC.



Fonte: Simões *et al.* (2023).

Figura 11: Ensaio de flexão em prisma de PC.



Fonte: Chandrappa & Biligiri (2016).

Desse modo, Costa *et al.* (2018) explicam que a utilização de pavimentos de concreto permeável é limitada a locais sujeitos a poucos esforços mecânicos como calçadas, estacionamentos, espaços de lazer e sub-bases para pavimentos convencionais. Tennis *et al.* (2004), apontam que os valores de resistência à compressão e resistência à tração na flexão do concreto permeável variam entre 3,5 e 28 MPa e 1 e 3,8 MPa, respectivamente. Assim, diversos estudos abordam alternativas em materiais e processos para o desenvolvimento de misturas de concreto permeável com maior resistência mecânica, a fim de viabilizar o amplo uso dessa tecnologia em sistemas com maior solicitação, como vias de tráfego intenso.

Nesse contexto, Huang *et al.* (2010) abordaram o uso de látex, fibra e agregados miúdos para otimizar o desempenho mecânico de concretos permeáveis. Os autores observaram que a incorporação dos componentes reduziu a porosidade das matrizes de concretos para quase todas as composições de agregados graúdos analisadas. Observou-se ainda redução do coeficiente de permeabilidade das misturas. Em relação ao desempenho mecânico, os autores observaram que a mistura com látex, agregado miúdo e agregados graúdos com o menor diâmetro característico adotado possibilitou a obtenção de maior resistência à compressão. À adição de fibra, por sua vez, observou-se que maiores resistências à tração na flexão foram obtidas em misturas com incorporação somente dessa, sem adição de agregado miúdo ou látex.

Ressalta-se, nesse sentido, que maiores resistências mecânicas podem ser obtidas através de melhorias no processo de compactação e adensamento da matriz de concreto, da otimização da distribuição granulométrica dos agregados graúdos utilizados, e das proporções e insumos utilizados na pasta de cimento, como aditivos e adições minerais. Dentre as opções consideradas, o uso de materiais alternativos apresenta, além do potencial mecânico, a

perspectiva de reduzir o consumo de cimento e, como consequência, o impacto ambiental proveniente da produção de pavimentos de concreto permeável.

Conforme Zhong *et al.* (2018), os testes feitos em concreto convencional não podem ser replicados em concreto permeável, pois a sua estrutura porosa inviabiliza tais métodos. Portanto, a ausência de métodos padronizados desenvolvidos para o concreto permeável em específico dificulta as comparações entre diferentes estudos. Os parâmetros principais estudados são: resistência à compressão e resistência à tração na flexão. A Tabela 3 mostra como a norma brasileira especifica os valores mínimos aceitos para a resistência mecânica, com base no tipo de revestimento que se pretende usar, o tipo de solicitação a que o material será submetido e a espessura mínima permitida.

Tabela 3: Requisitos de resistência de pavimentos permeáveis.

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica característica (MPa)	Método de ensaio
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60.0	$\geq 35.0^1$	ABNT NBR 9781
	Tráfego leve	80.0		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60.0	$\geq 20.0^1$	ABNT NBR 15805
	Tráfego leve	80.0		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60.0	$\geq 2.0^2$	ABNT NBR 15805
	Tráfego leve	80.0		
Concreto permeável moldado in loco	Tráfego de pedestres	60.0	$\geq 1.0^3$	ABNT NBR 12142
	Tráfego leve	100.0	$\geq 2.0^3$	

¹ Determinação de resistência à compressão, conforme na ABNT 9781.

² Determinação de resistência à tração, conforme na ABNT 15805.

³ Determinação de resistência à tração na flexão, conforme na ABNT 12142.

Fonte: ABNT (2015).

2.7 Efeitos dos MCS no Concreto Permeável

Há expectativa de crescimento da produção de cimento em 23% até 2050, em relação ao nível de produção atual. Conforme Cembureau (2017), tal nível de desenvolvimento é associado especialmente à produção do insumo em países em desenvolvimento, como Brasil, China, Índia, Rússia e África do Sul, que representam cerca de 81% da produção global de cimento. Essa perspectiva de crescimento fará com que a indústria cimenteira represente, em 25 anos, até 15% das emissões globais de gases poluentes associadas à ação humana (IEA, 2018).

Segundo Hewlett & Liska (2019), emite-se cerca de 0,86 kg de dióxido de carbono para cada kg de clínquer produzido. Desse modo, a redução dos impactos ambientais associados à indústria do cimento passa obrigatoriamente pelo incentivo ao uso de fontes alternativas como combustível, visando reduzir a queima de combustíveis fósseis, e pelo uso de insumos alternativos, recicláveis, ou resíduos que possam reduzir o consumo de clínquer sem prejudicar o desempenho mecânico e a durabilidade dos cimentos (Orsini; Marrone, 2019; Scrivener *et al.*, 2018; Reis *et al.*, 2021).

Surge, sob essa perspectiva, o potencial uso de materiais cimentícios suplementares (MCS). Estes são matérias-primas reativas ou inertes, de origem natural ou produzidas em determinadas indústrias, que podem ser incorporados à composição de cimentos para reduzir o consumo de clínquer. MCS reativos (pozolânicos) tem como vantagem, além dos aspectos ambientais supracitados, o refinamento dos poros na pasta de cimento e potencial aumento da resistência mecânica e à ação de agentes agressivos externos.

Isso ocorre porque durante as reações de hidratação do cimento, os silicatos presentes no clínquer geram como produtos o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), sendo esse o principal componente que confere resistência à matriz cimentícia. Para Saboo *et al.* (2019), os MCS reativos, que normalmente são materiais ricos em componentes alumino silicosos, reagem com o hidróxido de cálcio gerado durante o processo de hidratação dos componentes do cimento e formam mais silicatos de cálcio hidratado. Essas reações, mesmo que ocorram mais lentamente, contribuem para ganhos de resistência, especialmente após as idades iniciais.

Nessa perspectiva, Metha & Monteiro (2014) afirmam que os materiais pozolânicos podem ser classificados como naturais que consistem em produzir uma pozolana a partir do processo de britagem, moagem e separação, bem como os subprodutos provenientes das indústrias, que podem ou não requerer algum tratamento antes de serem utilizados. Desse modo, diversos estudos como os de Hanbing Liu *et al.* (2018) e Mohammed (2018), foram desenvolvidos com o objetivo de avaliar o uso de materiais cimentícios suplementares para substituírem parcialmente o cimento em matrizes de concreto permeável. A incorporação de materiais cimentícios suplementares às matrizes porosas tem o objetivo de aumentar a resistência e a durabilidade dos concretos. Cinza volante, metacaulim, cinza de casca de arroz (CCA), sílica ativa (SA) e outros, são alguns dos materiais que vêm sendo utilizados nos estudos, conforme mostra a Figura 12.

Figura 12: Materiais cimentícios suplementares.



Fonte: Adaptado de Araújo *et al.* (2023).

Para Lima *et al.* (2022), a utilização de resíduos da construção e demolição tem efeito econômico e ambiental positivo, uma vez que contribui para a redução do consumo de recursos naturais, reduz custos relacionados à manutenção de aterros sanitários, diminuição de áreas de depósitos desses resíduos, através da destinação adequada. O emprego das pozolanas nos concretos, substituindo parcialmente o cimento, trouxe benefícios às suas propriedades tanto na resistência à compressão, quanto na durabilidade, permeabilidade e porosidade. Porém, por serem materiais escassos, pararam de ser utilizados até que se notou a sua presença nos subprodutos industriais, dentre os quais destaca-se a SA.

As metalúrgicas são as principais geradoras dos subprodutos, essa atividade produz milhões de toneladas de resíduos todos os anos e, lançá-los em aterros e córregos, resultaria em desperdício de material, desencadeando sérios problemas ambientais. Nesta perspectiva, aproveitar o potencial pozolânico destes subprodutos na construção civil, como a SA, um aditivo mineral, resultaria em uma considerável economia de energia e de custo (Mehta; Monteiro, 2014). A Tabela 4 apresenta os teores de MCS utilizados em concretos permeáveis, conforme observado em alguns estudos analisados.

Tabela 4: Quantitativos obtidos por autores e características dos MCS.

Autores	Tipo de MCS	Características do MCS	Quantitativo* (%)
Maguesvari & Sundararajan (2017)	Cinza Volante (Classe C)	Teor de SiO ₂ = 51,56%	
		Massa específica: 2,45 g/cm ³	10% e 20%
Mohammed (2018)	Cinza Volante	Tamanho da partícula <450 µm	
		Teor de SiO ₂ : 36,4%	0 - 70%
Arshad <i>et al.</i> (2018)	Cinza de casca de arroz	Massa específica: 2,78 g/cm ³	
		Teor de SiO ₂ : 92%	
Hanbing Liu <i>et al.</i> (2018)	Sílica ativa	Massa específica: 0,15 g/cm ³	0 - 3%
		Área superficial específica: 100 ± 25 m ² /g	
Saboo <i>et al.</i> (2019)	Cinza Volante (Classe F)	Teor de SiO ₂ : 91,33%	
		Área superficial específica: 6,15 m ² /g; 6,85 m ² /g; 7,74 m ² /g e 8,85 m ² /g	10%
Costa (2019)	Metacaulim	Tamanho da partícula 0,1 - 0,3 µm	3, 6, 9 e 12%
		Massa específica: 2,27 g/cm ³	
	Sílica ativa	Teor de SiO ₂ : 47,5%	
		Massa específica: 2,471 g/cm ³	0 - 20%
		Área superficial específica: 4.200 m ² /kg	
		Teor de SiO ₂ : 50,85%	2%
		Massa específica: 2,601 g/cm ³	
		Tamanho da partícula: 18,62 µm	
		Massa específica: 2,27 g/cm ³	8%

*Percentual sobre a quantidade de cimento

Fonte: Autor (2025).

Mohammed *et al.* (2018) apontam também que a nano-sílica tem como vantagem ativar a reação da cinza volante, diminuindo assim a rugosidade da superfície interna dos poros interconectados, o que resultou em melhor desempenho em relação à penetração de água. Os autores observaram que o aumento da porcentagem de cinza volante na mistura implicou na redução da resistência à compressão dos concretos permeáveis. Quanto à permeabilidade, constatou-se que o aumento da quantidade de substituição do cimento por cinza volante proporcionou maiores valores de coeficientes de permeabilidade.

Arshad *et al.* (2018) produziram concreto permeável com cinza de casca de arroz (CCA). O cimento foi substituído por 10% de CCA. O estudo avaliou a influência da incorporação desse MCS proveniente de vários tempos de moagem (33h; 48h; 63h e 81h). Os autores notaram que é possível obter maior resistência à compressão à medida que se aumentem

os tempos de moagem para a produção da CCA. A maior resistência à compressão obtida foi de 18,99 MPa, nas amostras de concreto permeável com CCA proveniente do tempo de moagem de 63 horas. Segundo Ghosh *et al.* (2015), a CCA não pode substituir totalmente o cimento na produção de concreto permeável. Teores entre 10 e 12% deste MCS são considerados ideais para se obter um concreto permeável com bons desempenhos mecânicos e hidráulicos.

Hanbing Liu *et al.* (2018) utilizaram a sílica ativa em substituição parcial do cimento, trabalhando com porcentagens entre 3 e 12% na produção de concreto permeável. Com relação à porosidade, os autores projetaram um alcance de 15% de porosidade no concreto permeável produzido. A resistência à compressão obtida no traço com adição de sílica ativa foi de 20 MPa, conforme recomendado por regulamentações chinesas, e observaram que quando aumentado gradualmente o percentual de sílica ativa, principalmente nos teores de 9 e 12%. Quanto a resistência a flexão, os grupos de concreto modificado com SA apresentaram a resistência à flexão máxima de 5,2 MPa, com melhora de 7,4%, sem variações significativas para concretos com teores de sílica ativa entre 9% e 12%.

Para Seidenstucker *et al.* (2019), a utilização de adições minerais, substituindo parcialmente o cimento Portland em concretos, é uma solução futura para os problemas enfrentados pelas indústrias metalúrgicas, as quais ainda não possuem um destino aos resíduos produzidos. Desse modo, os MCS são considerados como opções viáveis para otimizar o desempenho do concreto permeável. Dentre todos os citados, os que apresentaram bons resultados na sua utilização para produção de concreto permeável, foram: sílica ativa, cinza de casca de arroz e cinza volante. Pode-se observar que a partir da utilização de sílica ativa e de até 10% de CCA é possível obter resultados mecânicos satisfatórios.

2.8 Características gerais do Concreto Permeável

2.8.1 Permeabilidade

Em se tratando de permeabilidade, Solminihac *et al.* (2007) analisaram o comportamento de diferentes dosagens de concreto permeável, fabricados em laboratório e compactado com rolos pesados, considerando a taxa de vazios no concreto endurecido e a relação água/cimento. Um dos projetos apresentou excelente capacidade hidráulica e resistência 20% superior às misturas da literatura. Os autores constataram que um índice de vazios de 14% atende aos requisitos de permeabilidade e que a resistência máxima à flexão foi alcançada com 250 l/m³ de pasta de cimento. Foram identificadas relações entre índice de

vazios, permeabilidade e resistência a flexão aos 28 dias, além das dosagens com melhor desempenho mecânico e hidráulico. Foi utilizado agregado grosso (nº 8), sem finos e com um tamanho nominal máximo de 10 mm, a densidade aparente compactada seca foi de 1520 kg/m³, a percentagem de vazios de 43% e a absorção de água de 1,6%.

O estudo também analisou a influência da porcentagem real de vazios e da relação água/cimento (*a/c*) no concreto poroso. Segundo a literatura, misturas permeáveis devem ter pelo menos 15% de vazios, correspondendo a uma taxa de infiltração mínima de 3,5 mm/s, valor adotado como referência. Os autores relatam que nos estudos de Meininger foi indicado que índices de vazios entre 15% e 20% resultam em concreto permeável com resistência média, levando à escolha de 15%, 17% e 19% para análise. Os autores utilizaram a Eq. 1 para obter o teor de cimento necessário para cada mistura preparada para este estudo, tomando a massa do concreto no estado fresco como a soma da massa do cimento, água, agregado e aditivo.

$$M_c(kg) = \left[\frac{(10 \cdot V_a - 1000) \cdot FC + 965,48 - 11,14 \cdot V_r}{\left(\frac{1}{\gamma_c} + (a/c) + \frac{D_{ad}}{100 \cdot \gamma_{ad}} \right) \cdot FC} \right] \quad \text{Eq. 1}$$

Em que, γ_c e γ_{ad} são a densidade aparente do cimento e do aditivo, respectivamente, e D_{ad} é a dosagem do aditivo expressa em percentagem do peso do cimento, FC é o fator de compressão, V_a é o volume inicial de vazios no agregado, V_r é a porcentagem real de vazios. Os autores destacam que dois testes iniciais foram desenvolvidos para determinar o fator de compressão (FC).

Além disso foi utilizado cimento Portland de endurecimento rápido com uma densidade aparente de 2950 kg/m³, ao qual foi adicionado um aditivo redutor de água (0,5% em peso de cimento) com uma densidade aparente de 1,16 kg. O estudo analisou a influência da porcentagem real de vazios e da relação água/cimento (*a/c*) no concreto poroso. Foram testadas relações *a/c* de 0,29 a 0,44, abrangendo misturas que vão desde materiais de baixa resistência, baixa relação água-cimento e alta permeabilidade até misturas mais fluidas e resistentes, com elevada relação água-cimento e menor permeabilidade. O teor de cimento foi ajustado conforme essas variáveis. A Tabela 5 apresenta os traços utilizados.

Tabela 5: Dosagem de concreto poroso.

<i>a/c</i>	Porcentagem real de vazios na mistura (V_r)		
	15%	17%	19%
0,29	427	390	353
0,32	408	373	337
0,35	390	355	323
0,38	374	342	309
0,41	359	328	297
0,44	345	315	285

Fonte: Adaptado de Solminihac *et al.* (2007).

Para os ensaios, foi utilizado um rolo de 300 mm de diâmetro, 600 mm de largura e 115 kg, aplicando uma pressão de 0,08 MPa. Foram moldadas mini-lajes de (550 x 400 x 150) mm. Posteriormente, as mini-lajes foram cortadas a fim de obter corpos de prova prismáticos (150 x 150 x 5500) mm para testes de resistência à flexão. No total, os autores analisaram dezoito misturas diferentes de concreto, com dois lotes de cada, totalizando 36 amostras. Além de realizar duas mini-lajes de cada lote, totalizando 72 lajes e 144 corpos de prova.

Os autores realizaram três ensaios em concreto endurecido: resistência à flexão, índice de vazios real e permeabilidade. Como o material é destinado a pavimentos, a resistência à flexão foi avaliada com carga de três pontos, totalizando 108 ensaios (três corpos de prova por mistura). O índice de vazios foi medido em 144 amostras utilizando o princípio de Arquimedes. A permeabilidade foi determinada com um permeâmetro de queda livre em todas as 72 mini-lajes antes do corte dos corpos de prova (Figura 13).

Figura 13: Compactação nos moldes e ensaio com permeâmetro de carga variável, respectivamente.

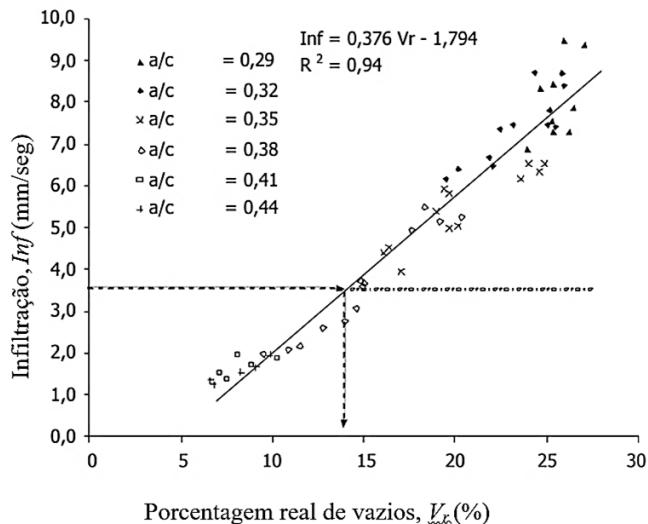


Fonte: Solminihac *et al.* (2007).

Os resultados do permeâmetro de queda livre (Figura 14) indicam que misturas com relações *a/c* de 0,41 e 0,44 não são adequadas para concreto poroso, pois apresentam baixa porcentagem de vazios. Apenas misturas com *a/c* de 0,38 ou menos devem ser utilizadas para concretos permeáveis. Além disso, misturas com índice de vazios superior a 14% apresentaram taxa de infiltração acima de 3,5 mm/s. Os autores destacam que, devido à variação do fator de

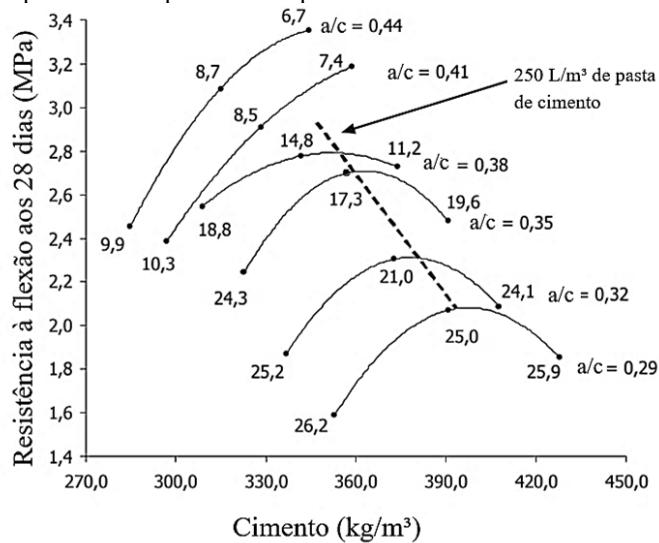
compactação, os índices reais de vazios diferiram dos projetados, impossibilitando a construção de curvas para taxas de vazios constantes. Em vez disso, foram traçadas curvas para relações a/c constantes. A Figura 15 mostra os resultados dos ensaios de resistência à flexão aos 28 dias em relação ao teor de cimento para relações a/c constantes.

Figura 14: Relação entre a taxa de infiltração e a porcentagem real de vazios.



Fonte: Adaptado de Solminihac *et al.* (2007).

Figura 15: Efeito da quantidade e qualidade da pasta na resistência à flexão do concreto aos 28 dias.



Fonte: Adaptado de Solminihac *et al.* (2007).

Os resultados mostraram que misturas com relação a/c inferior a 0,32 não são recomendadas para superfícies sujeitas a tráfego de rodas, pois, apesar de apresentarem mais vazios, sua resistência é menor, além de ser observado problemas relacionados ao desprendimento do agregado superficial devido à pasta insuficiente para o reter e dificuldades de colocação atribuída à umidade insuficiente da mistura. Os autores explanam que a resistência à flexão do concreto permeável é influenciada pela distribuição dos vazios e pelo

volume da pasta de cimento. Inicialmente, o aumento do teor de cimento melhora a resistência, mas, em excesso, separa as partículas e reduz o efeito de intertravamento, enfraquecendo as ligações. Assim, existe uma espessura ótima da pasta que maximiza a resistência. A dose ideal de cimento pode ser encontrada a partir da relação entre a resistência à flexão e o teor de cimento para misturas com uma determinada relação a/c . Os resultados destes cálculos para misturas com relações a/c não superiores a 0,38 são apresentados na Tabela 6.

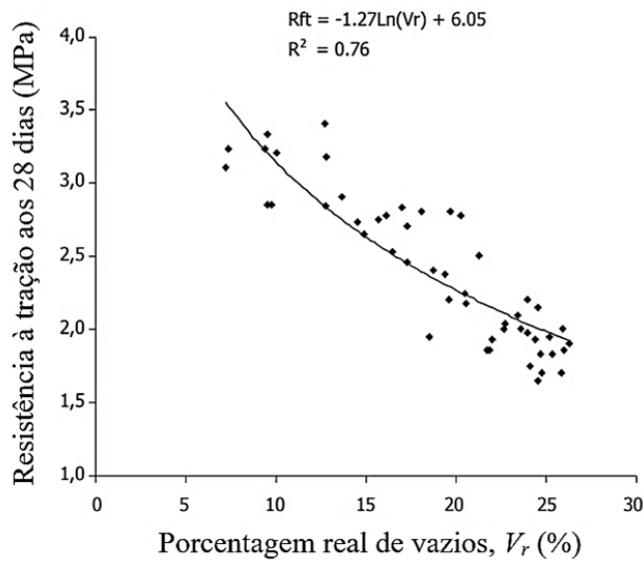
Tabela 6: Volume de pasta associado a dosagem ótima de cimento.

Razão a/c	Cimento (kg/m ³)	Pasta de cimento (L/m ³)
0,29	398	250
0,32	378	249
0,35	363	250
0,38	352	253

Fonte: Adaptado de Solminihac *et al.* (2007).

Os cálculos indicam que, para relações a/c até 0,38, o volume ideal de pasta é cerca de 250 l/m³, representando 60% dos vazios do agregado. Além disso, com o aumento da relação a/c , a pasta flui melhor para os vazios sem comprometer a estrutura, o que contribui para um leve aumento na resistência. Por fim, a Figura 16 mostra que a relação entre a resistência à flexão aos 28 dias e o índice de vazios real é linear para todos os espécimes testados. Esta relação é útil para as estimativas de campo da resistência à flexão a partir de medições da taxa de vazios feitas por um permeâmetro de queda livre.

Figura 16: Relação entre a resistência à flexão aos 28 dias e a porcentagem real de vazios.



Fonte: Adaptado de Solminihac *et al.* (2007).

A partir do exposto, os autores recomendam uma relação água/cimento (a/c) entre 0,35 e 0,38 para concretos porosos. Misturas com proporções mais baixas têm resistência muito baixa, enquanto misturas com proporções mais altas diminuem o índice de vazios devido ao fluxo excessivo da pasta de cimento. A resistência máxima à flexão é alcançada com uma

quantidade ótima de cimento, onde o engrenamento dos agregados e o volume adequado de pasta são cruciais. Concretos com índice de vazios superior a 14% atendem ao requisito de permeabilidade (taxa de infiltração > 3,5 mm/s). O concreto mais resistente testado teve uma relação a/c de 0,38, com 350 kg de cimento e 0,5% de aditivo, resultando em resistência de 2,8 MPa e 14% de vazios. Misturas com 20% de vazios atingiram resistência superior a 2,3 MPa com 320 kg de cimento e relação a/c de 0,35.

Dentro desses termos, pode-se citar também a pesquisa de Shan *et al.* (2022), que realizou um estudo sobre a relação entre as características dos poros e os atributos de permeabilidade do concreto permeável, os autores estabeleceram um modelo tridimensional de poros baseados na tecnologia da tomografia computadorizada (TC) e no software AVIZO. Para este estudo, foi utilizado o cimento Portland comum, quanto aos agregados foi utilizado o agregado de basalto, dividido em duas gamas de tamanho de partículas, ou seja, D1: 2,36–4,75 mm e D2: 4,75–9,5 mm. A graduação agregada –2,36–4,75 mm (30%), 4,75–9,5 mm (70%) – foi utilizada neste estudo. A proporção é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7: Proporção da mistura do concreto permeável (kg/m³).

Porosidade projetada (%)	Agregado	Cimento	Água
18	1670	403	121
21	1670	329	116
24	1670	307	92

Fonte: Adaptado de Shan *et al.* (2022).

Em relação aos métodos de ensaio, os autores realizaram o método da pedra envolvida no cimento, que combina os métodos de compactação e socagem. O dispositivo de compactação para concreto permeável foi de fabricação própria, garantindo maior densidade e melhor moldagem das arestas. O processo envolve compactação em camadas e impacto controlado de um martelo a 800 mm de altura, repetido 39 vezes.

Os espécimes de dimensões (100 x 100 x 100) mm foram curados por 28 dias em ambiente controlado. Amostras com porosidades de 18%, 21% e 24% foram classificadas para medir a porosidade e a permeabilidade efetivas. O dispositivo de compactação e os provetes de conformação são apresentados na Figura 17. Os autores também realizaram a comparação das estruturas com a porosidade do modelo de reconstrução 3D.

Figura 17: Dispositivo de compactação e amostra de concreto permeável.



Fonte: Adaptado de Shan *et al.* (2022).

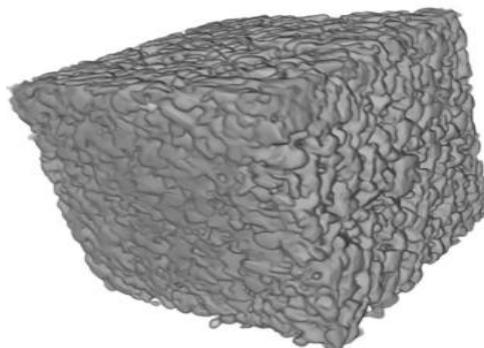
Ademais, o método de carga de água variável foi utilizado neste estudo para determinar o coeficiente de permeabilidade da amostra (Figura 18). Quanto a tomografia computadorizada e a extração de dados de estruturas de poros, os autores selecionaram o exemplar de concreto permeável com melhor desempenho de permeabilidade e realizaram a tomografia computadorizada com precisão de 0,05 mm. Devido ao ruído nas imagens, foi aplicado um filtro de mídia não local antes da permanência 3D no software AVIZO. A Figura 19 apresenta o modelo 3D em escala de cinzas após o processamento.

Figura 18: Dispositivo de permeabilidade para concreto permeável.



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

Figura 19: Modelo tridimensional de concreto permeável.



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

Os autores utilizaram o software AVIZO para identificar os poros, separar, e remover os poros fechados e irregulares. Para analisar quantitativamente as características de distribuição espacial dos poros, é necessário marcar os poros no modelo construído para que as características da distribuição dos poros possam ser observadas intuitivamente. A situação de infiltração monofásica no concreto permeável foi simulada usando um modelo 3D mesoscópico. A simulação analisou o fluxo de fluido entre os poros, a velocidade do fluxo e os canais de infiltração, fornecendo uma visão detalhada dos padrões de permeabilidade. A permeabilidade absoluta, a tortuosidade e as dimensões fractais foram calculadas para entender melhor a capacidade de transmissão de fluido do material. A permeabilidade absoluta foi definida como a capacidade do material poroso de transmitir fluido monofásico.

Quanto aos resultados, os autores destacam que, a porosidade total foi determinada de acordo com a composição do material, enquanto o método volumétrico foi utilizado para o cálculo da porosidade efetiva. De acordo com a Tabela 8, quando a porosidade é pequena, podem ser formados muitos poros fechados dentro do concreto permeável. No entanto, a permeabilidade do concreto permeável depende principalmente dos poros ligados dentro do concreto permeável.

Tabela 8: Porosidade do concreto permeável.

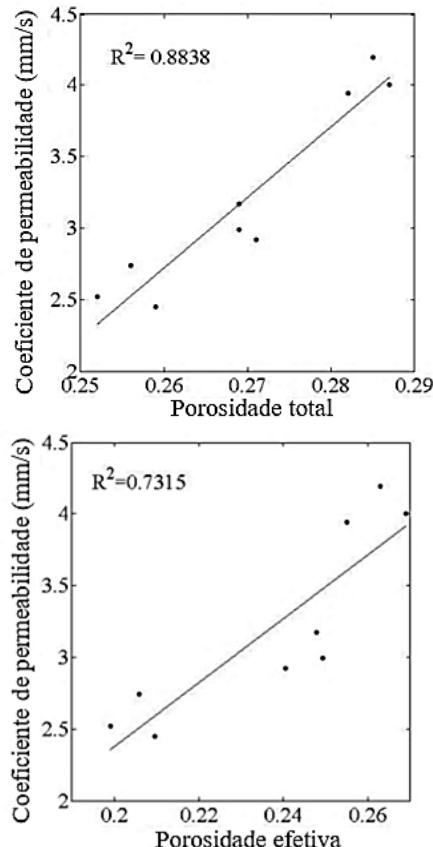
Porosidade projetada (%)	Número	Massa Água (g)	Massa seca (g)	Volume (cm ³)	Porosidade efetiva (%)	Porosidade total (%)
18	A1	1307	2132	1030	19,90	25,20
	A2	1307	2125	1035	20,97	25,90
	A3	1302	2120	1030	20,58	25,60
21	B1	1290	2052	1015	24,93	26,90
	B2	1285	2050	1017	24,78	26,90
	B3	1274	2045	1015	24,04	27,10
24	C1	1254	1985	1000	26,90	28,70
	C2	1253	1990	1000	26,30	28,50
	C3	1255	2000	1000	25,50	28,20

Fonte: Adaptado de Shan *et al.* (2022).

Para o coeficiente de permeabilidade (Figura 20), os autores afirmam que a porosidade efetiva influencia no coeficiente de permeabilidade do concreto permeável. Quando a porosidade efetiva é relativamente elevada, o concreto permeável apresenta uma boa permeabilidade; quando as porosidades dos diferentes concretos permeáveis são semelhantes, o desempenho da permeabilidade é afetado pelos parâmetros da estrutura dos poros. Ou seja, o atributo permeabilidade não é completamente determinado pela proporção volumétrica do

vazio, tem também uma forte relação com as características dos poros, como a distribuição de tamanhos, a distribuição espacial e a tortuosidade.

Figura 20: Coeficiente de permeabilidade para diferentes porosidades.



Fonte: Adaptado de Shan *et al.* (2022).

Quanto a resistência à compressão, os resultados são apresentados na Tabela 9. Os autores relataram que a resistência do concreto permeável é significativamente afetada pela sua porosidade, ou seja, a resistência à compressão diminui com o aumento da porosidade. A permeabilidade do concreto permeável é influenciada pelos poros conectados internamente. Na Tabela 10 é apresentado os resultados do modelo de reconstrução 3D, sendo estes são relativamente precisos. Ademais, os autores ressaltam que a uniformidade da distribuição de poros diminui com o aumento da porosidade. A dimensão fractal do concreto é maior nas extremidades superiores e inferiores, refletindo a complexidade do formato dos poros nessas áreas.

Tabela 9: Resistência à compressão do concreto permeável.

Porosidade projetada (%)	Resistência à compressão (MPa)
18	27,4
21	21,8
24	19,7

Fonte: Adaptado de Shan *et al.* (2022).

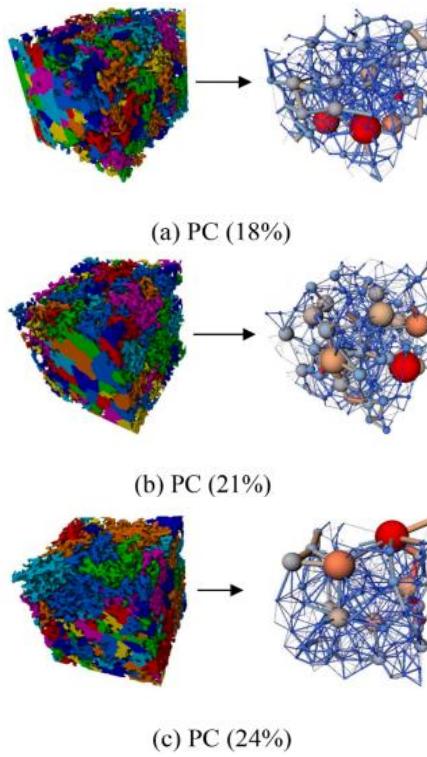
Tabela 10: Comparação de resultados de porosidade experimental e simulados.

Número da amostra	Porosidade total medida (%)	Porosidade efetiva medida (%)	Porosidade total simulada (%)	Porosidade efetiva simulada (%)
1	25,2	19,90	20,14	19,47
2	27,1	24,04	23,88	23,65
3	28,7	26,90	26,58	26,38

Fonte: Adaptado de Shan *et al.* (2022).

Com o aumento da porosidade, o grau de correlação linear entre a porosidade e a dimensão fractal enfraquece gradualmente, e o coeficiente de ajuste também diminui de acordo. Quando a porosidade é relativamente baixa, a porosidade efetiva e a dimensão fractal têm um grau de correlação linear maior. Os autores destacam que, o modelo de rede de poros equivalente combina dimensão espacial e imagens 2D para simular o fluxo de fluidos nos poros internos do concreto permeável. A simulação de infiltração de duas fases é realizada neste modelo, que é composta por unidades básicas de poros e gargantas (Figura 21). A distribuição de frequência do volume de poros equivalentes é comprovada a partir dos dados encontrados.

Figura 21: Modelo de rede de poros equivalente.

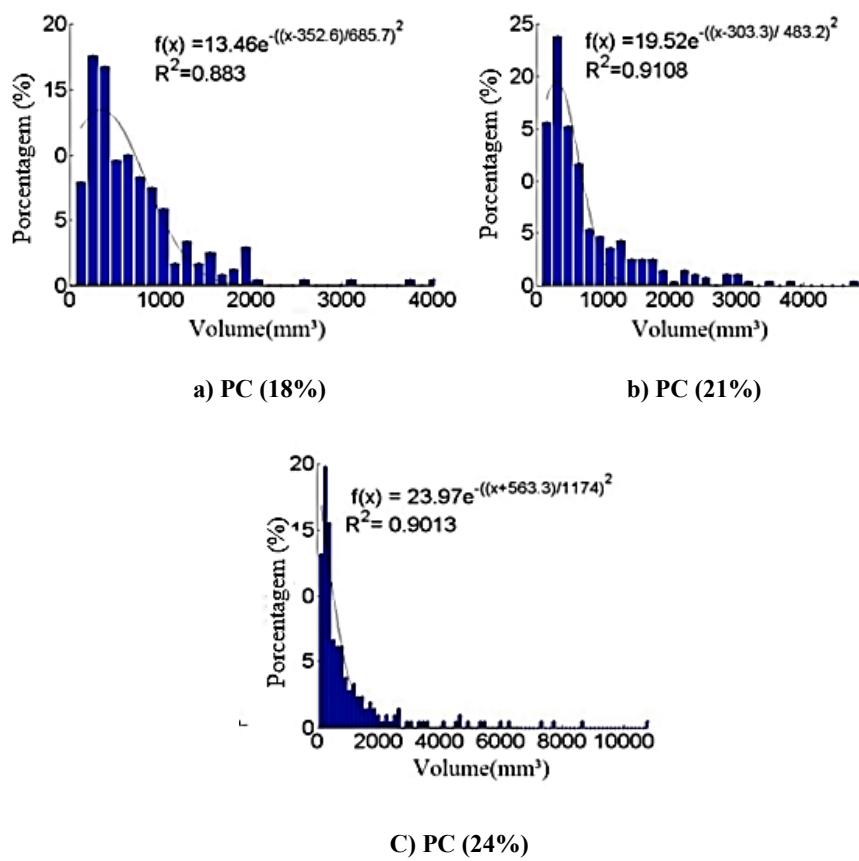


Fonte: Shan *et al.* (2022).

Os dados de poros extraídos após a construção do modelo de rede de poros equivalente caracterizaram quantitativamente a estrutura espacial dos poros e plotou diagramas para analisar a distribuição do tamanho dos poros, como mostrado na Figura 22. Em casos com

porosidade de 24%, há poucos poros grandes. Para analisar a frequência de distribuição do volume de poros para as diferentes porosidades, foram selecionados os poros com volume menor que 4000 mm^3 . A distribuição do volume de poros segue a distribuição gaussiana, com a maioria dos volumes entre 0 e 2000 mm^3 , e os poros menores que 1000 mm^3 dominando. Para diferentes porosidades (18%, 21%, 24%), os volumes de poros variam, sendo maior com maior porosidade. A distribuição do volume de poros mostra um pico único, diminuindo uma distribuição uniforme dos tamanhos. A proporção de poros menores aumenta com a porosidade, e poros grandes podem melhorar a permeabilidade ao aumentar a velocidade do fluxo de fluido.

Figura 22: Distribuição do tamanho dos poros 3D.

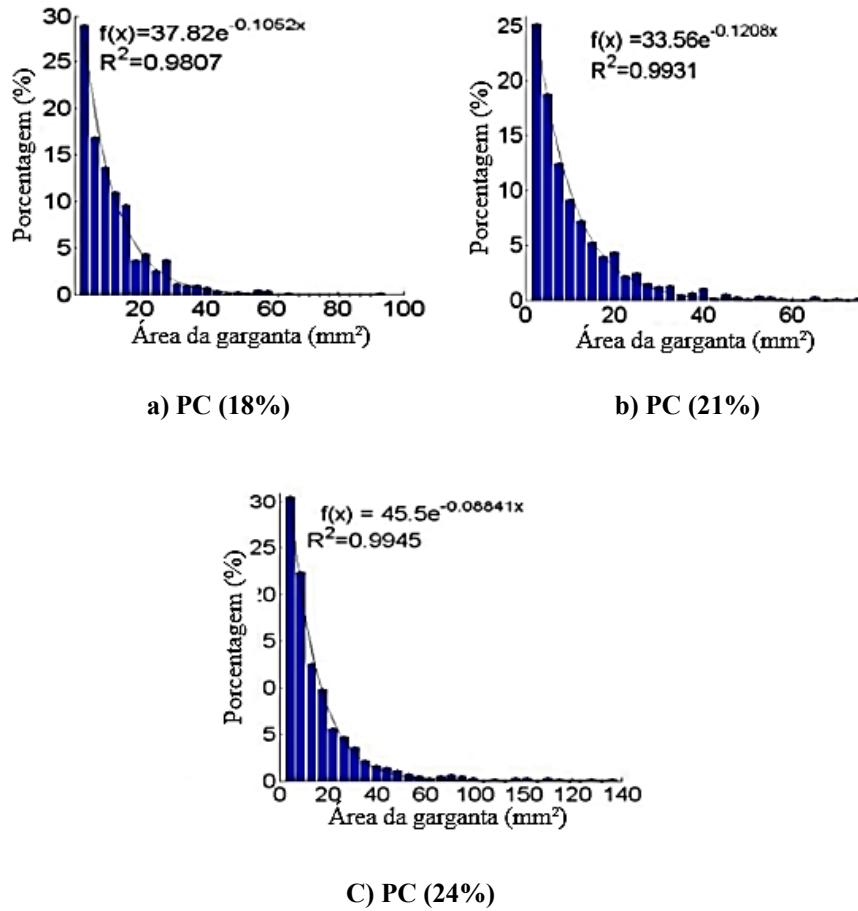


Fonte: Adaptado de Shan *et al.* (2022).

A área da garganta segue uma distribuição exponencial (Figura 23), com tamanhos pequenos (até 30 mm^2). Para os espécimes com diferentes porosidades (18%, 21%, 24%), a área máxima e mínima da garganta variando, com valores médios de 10.058 mm^2 , 9.894 mm^2 e 14.001 mm^2 , respectivamente. O comprimento da garganta, que indica a distância entre os centros de poros adjacentes, tem uma distribuição gaussiana (Figura 24), com valores entre 8 mm e 16 mm respondendo por 85% das gargantas. O comprimento máximo varia de 44.224 mm a 57.198 mm, e as médias aumentam com a porosidade. Com o aumento dos vazios, a área

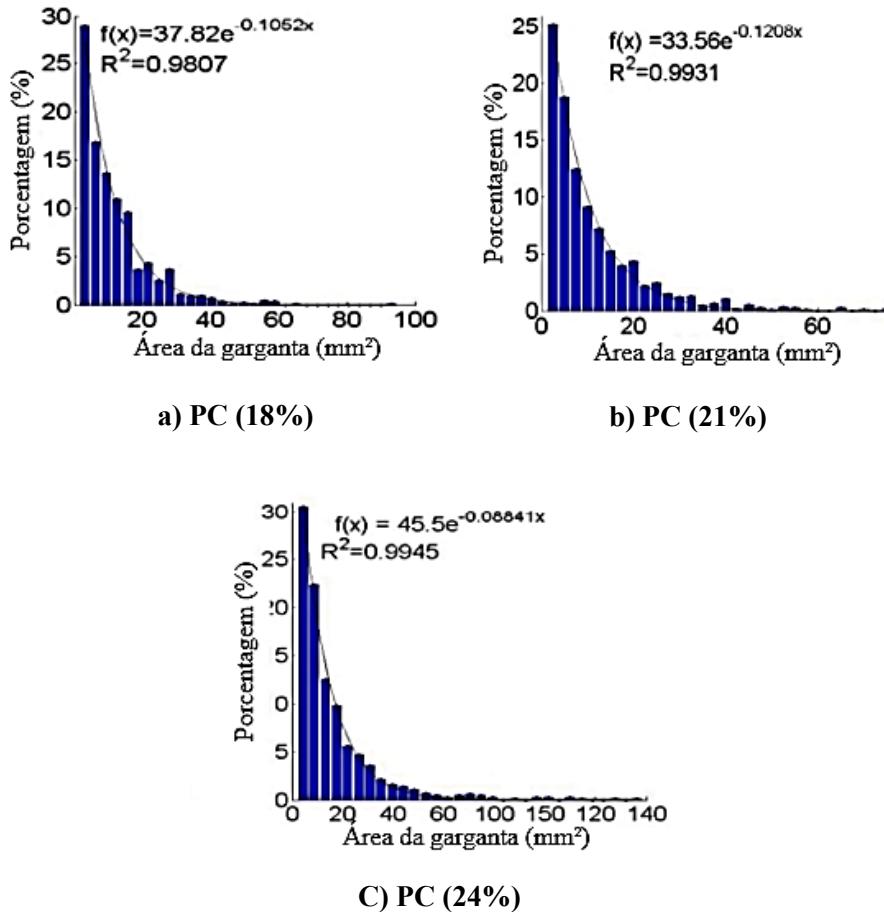
média e o comprimento das gargantas diminuem, e apresentam boa homogeneidade. A área maior e o comprimento menor da garganta favorecem maior fluxo de fluido. No entanto, a estrutura dos poros é mais complexa em exemplos reais, e vários fatores influenciam a permeabilidade do concreto.

Figura 23: Distribuição da área da garganta 3D.



Fonte: Adaptado de Shan *et al.* (2022).

Figura 24: Distribuição do comprimento da garganta 3D.



Fonte: Adaptado de Shan *et al.* (2022).

O número de coordenação indica o número de gargantas que estão conectadas a um corpo de poros, sendo crucial para caracterizar a conectividade dos poros do concreto permeável. Os autores compararam os resultados de simulação e experimentais do comportamento de infiltração do concreto permeável (Tabela 11) e ressaltaram que os resultados da simulação de infiltração desviaram dos resultados dos testes experimentais principalmente por três razões: cortes nas imagens 3D para reduzir a pressão computacional, idealização da conectividade dos poros na construção 3D e a influência de fatores diversos no coeficiente de permeabilidade experimental. No entanto, da perspectiva da ordem de magnitude dos resultados da simulação, os resultados da simulação de infiltração mesoscópica concordaram bem com os resultados experimentais macroscópicos, corroborando com a viabilidade da simulação de infiltração monofásica com base no modelo mesoscópico de reconstrução 3D.

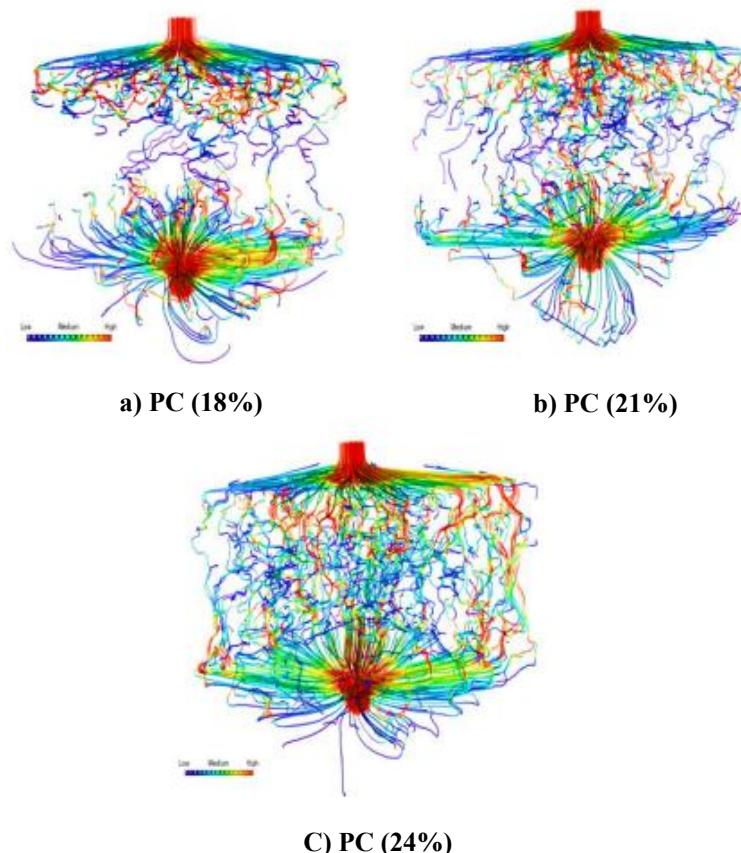
Tabela 11: Comparação de resultados de porosidade experimental e simulados.

Porosidade efetiva medida (%)	Porosidade efetiva simulada (%)	Coeficiente de permeabilidade medido (mm/s)	Coeficiente de permeabilidade simulado (mm/s)
19,90	19,47	2,52	1,948
24,04	23,65	2,92	2,662
26,90	26,38	4,00	4,690

Fonte: Adaptado de Shan *et al.* (2022).

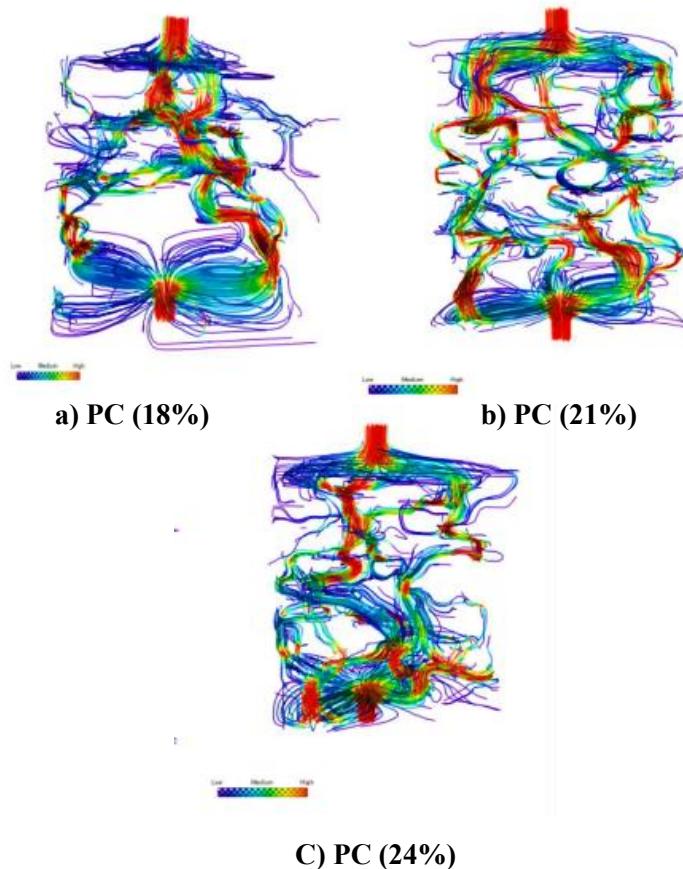
Os resultados da simulação indicaram que o fluido tende a escoar preferencialmente por regiões com poros maiores e caminhos de infiltração mais curtos, devido à menor resistência ao fluxo. A Figura 25 ilustra a distribuição das linhas de caminho dos canais de infiltração dentro dos espécimes com diferentes porosidades. À medida que a porosidade aumenta, o número de canais de infiltração também cresce, o que melhora a permeabilidade. O desempenho de permeabilidade é fortemente influenciado pela quantidade e estrutura dos canais de infiltração. O aumento da porosidade resulta em canais de infiltração mais espessos e de menor tortuosidade. A Figura 26 mostra os mapas de linhas de caminho de infiltração local de concreto permeável com diferentes porosidades.

Figura 25: Linhas de via de infiltração de concreto permeável.



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

Figura 26: Linhas de via de infiltração local de concreto permeável.



Fonte: Adaptado de Shan *et al.* (2022).

Os autores verificaram que há uma relação linear entre a dimensão fractal e a porosidade do concreto permeável. Com o aumento da porosidade, observa-se uma diminuição da tortuosidade, bem como o aumento no número de poros e no tamanho máximo desses poros, cujos volumes, em geral, se situam entre 0 e 2000 mm³. A distribuição do tamanho das gargantas dos poros apresenta comportamento próximo ao de uma distribuição normal. Além disso, o acréscimo da porosidade favorece a conectividade da rede porosa e eleva o número de coordenação entre os poros. Os resultados das simulações indicam que o aumento da porosidade, associado à redução da tortuosidade e ao crescimento dos canais de infiltração, contribui para a elevação da permeabilidade do material. Tais resultados mostraram-se coerentes com os dados obtidos nos ensaios experimentais.

2.8.2 Porosidade

Em relação a porosidade, a pesquisa de Höltz (2011) pode ser citada como referência, uma vez que a pesquisa teve como objetivo desenvolver um concreto permeável para aplicação em grandes áreas, buscando compreender suas propriedades e formular diferentes traços. Foram caracterizados os materiais, estudadas as dificuldades de fabricação em campo e

avaliadas as possibilidades de aplicação e repercussão na drenagem urbana. O estudo é dividido em quatro etapas: preliminar, em que houve a prospecção da melhor combinação a/c e m , a partir do teste de um conjunto de traços derivados das recomendações do ACI 522-06 “Pervious Concrete”; etapa do estudo complementar que contempla a seleção do traço com $m= 5$ e $a/c= 0,30$, e estudo de traço com $m= 4$, além da análise dos traços com brita, pedrisco e areia e os efeitos de formas de vibração; etapa de análise do efeito de extração, em que houve a comparação dos resultados de resistência à compressão entre os CPs extraídos e moldados; e a etapa de ensaios de permeabilidade, com a realização dos ensaios de permeabilidade e análise final dos resultados obtidos.

Inicialmente, o autor realizou um estudo exploratório com concretagens experimentais para testar diferentes traços de concreto permeável utilizando como variável a relação água/cimento (a/c) e o teor de agregado (m). Os traços foram formulados com materiais locais. Foram testadas 12 combinações, resultantes de quatro relações água/cimento (0,26; 0,30; 0,35; 0,45), mantendo uma boa capacidade de percolação com uma capacidade de adesão que garanta a estabilidade de forma do material, e três proporções de agregados (1:5, 1:7 e 1:9) a fim de buscar uma combinação mais econômica, resistente e suficientemente permeável.

Um ajuste do autor consistiu em investigar o traço 1:5 juntamente com um traço mais rico 1:4, para verificar se seria possível melhorar a resistência ao aumentar o teor de massa, já que os melhores resultados de resistência à análise foram obtidos com a relação 1:5 e/c de 0,30. Sendo assim, o autor optou por realizar os estudos com os traços de $m= 5$, avaliando os efeitos da adição de brita 0 (pedrisco) e pequenas quantidades de areia, em substituição à brita 1. Ademais, a relação a/c foi fixada em 0,30 pois o autor observou que para relação a/c igual 0,26 a mistura tendia a ficar muito seca e a relação a/c igual 0,45, a pasta escorria e entupia os poros do concreto, comprometendo a sua permeabilidade. Na Figura 27 é possível observar a mistura com relação igual a 0,45.

Figura 27: CPs do traço com relação a/c de 0,45, com poros obstruídos.



Fonte: Höltz (2011).

Posteriormente, foi analisado o efeito da vibração e alteração da metodologia de obtenção dos corpos de prova para os ensaios de resistência mecânica e permeabilidade. O autor optou por concretar blocos e extraír amostras cilíndricas, garantindo maior homogeneidade e representatividade do material. Essa abordagem é compatível com a aplicação do concreto permeável em pavimentos, onde a concretagem é realizada em grandes volumes, com o uso de rolos vibratórios e camadas finas. Alguns corpos de prova foram extraídos na vertical (lateral do bloco com maior altura) e outras na horizontal (do centro de blocos com menor altura e maior área transversal). Os resultados dessa etapa mostraram que a brita se ajusta melhor nas formas maiores, conforme pode ser observado na Figura 28.

Figura 28: Aspecto visual de corpo de prova extraído de bloco de concreto e corpo de prova moldado, respectivamente.



Fonte: Adaptado de Höltz (2011).

Por fim, foram realizados os ensaios de permeabilidade, utilizando o método de ensaio proposto por Neithalath *et al.* (2003). Foram testados apenas corpos de prova com relação a/c

de 0,30; mas com valores de $m = 4$ e $m = 5$; extraídos e moldados; fabricados somente com brita 1, somente com brita 0, ou com brita 1 e 7% de adição de areia; adensados com vibrador ou manualmente. A partir da segunda etapa, alguns traços passaram a incluir uma porção de agregado miúdo. Quanto aos traços, para a primeira etapa foram estudadas 12 combinações, a fim de verificar qual mistura apresentaria boa reologia e bons resultados de resistência à compressão, com o intuito de selecionar traços para os ensaios de permeabilidade. Na Tabela 12 tem-se os traços utilizados na primeira etapa desta pesquisa.

Tabela 12: Traços do concreto da etapa 1 da pesquisa.

Traço	Relação 1:m	Relação a/c	Cimento (kgf)	Brita 1 (kgf)	Água (kgf)
I-a (526B)	1:5	0,26	5,9	29,24	1,53
I-b (530B)		0,30	5,9	29,24	1,77
I-c (535B)		0,35	5,9	29,24	2,06
I-d (545B)	1:7	0,45	5,9	29,24	2,65
I-e (726B)		0,26	4,42	30,96	1,15
I-f (730B)		0,30	4,42	30,96	1,33
I-g (735B)		0,35	4,42	30,96	1,55
I-h (745B)	1:9	0,45	4,42	30,96	1,99
I-i (926B)		0,26	3,54	31,85	0,92
I-j (930B)		0,30	3,54	31,85	1,06
I-k (935B)	1:9	0,35	3,54	31,85	1,24
I-l (945B)		0,45	3,54	31,85	1,59

Fonte: Adaptado de Höltz (2011).

Com a finalização da primeira etapa, o autor obteve como melhor resultado a relação 1:5 com a/c igual a 0,3 e optou por também estudar a relação 1:4 na etapa 2. Além disso, decidiu-se testar a influência do pedrisco ao invés da brita 1, e em alguns traços, o autor decidiu incorporar uma pequena porcentagem de agregado fino (areia), a fim de verificar se essa adição seria capaz de proporcionar maior capacidade de adesão e resistência ao material, sem comprometer a permeabilidade. Outra mudança na etapa 2 foi a extração dos corpos de prova por blocos maiores. Os traços usados na etapa 2, com essas combinações, são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Traços do concreto da etapa 2 da pesquisa.

Traço	Relação pasta/materiais secos (1:m)	a/c	Forma de extração	Brita 1 (%)	Pedrisco (%)	Areia (%)
II-a (430VB)			Vertical	100	-	-
II-b (430HB)			Horizontal 1	100	-	-
II-c (430VBA)			Vertical	93	-	7
II-d (430HBA)	1:4		Horizontal 1	93	-	7
II-e (430VP)		0,30	Vertical	-	100	-
II-f (430HP)			Horizontal 1	-	100	-
II-g (530HB)				100	-	-
II-h (530HBA)	1:5		Horizontal 1	93	7	-
II-i (530HP)				-	-	100

Fonte: Adaptado de Höltz (2011).

Para esta pesquisa, o autor realizou o ensaio de compressão axial e o ensaio de permeabilidade, baseado na proposta de Neithalath *et al.* (2003), visto na Figura 29. Quanto aos resultados, para a primeira etapa o autor obteve os valores para resistência à compressão entre aproximadamente 3 e 9 MPa. O autor destaca que para o traço com relação 1:5 e 1:7, foi verificado que os traços com relação *a/c* menores tendem a ter maior variabilidade, o que está associado a problemas de moldagem decorrentes da menor trabalhabilidade, aspecto notável durante a fabricação dos corpos de prova. Assim, o autor constatou que, para a primeira etapa a resistência à compressão e a morfologia do corpo de prova variou consideravelmente em função de *m* e *a/c*. Ademais, a resistência à compressão não se mostrou governada pela relação *a/c*, como acontece com os concretos convencionais.

Figura 29: Aparelho construído para medição da condutividade hidráulica das amostras de concreto permeável.



Fonte: Höltz (2011).

Os traços com maior relação a/c tenderam a desenvolver maiores valores de resistência, especialmente na faixa de 0,30 a 0,35. O autor acredita que isso decorre do fato de que, com uma maior relação a/c , a mistura ganha trabalhabilidade e a pasta consegue lubrificar melhor a mistura, permitindo uma melhor acomodação dos agregados, que ficam mais bem envoltos. Para a segunda etapa foi utilizado um traço com $m = 4$ e relação $a/c = 0,30$. O traço foi variado usando brita 0 e brita 1 com uma pequena porcentagem (7%) de agregado fino, buscando evitar que a pasta preenchesse os poros e comprometesse a trabalhabilidade. Para avaliar o tipo de vibração, os traços com brita 1 e brita 1 com areia utilizou-se o método sem adensamento com vibração, sendo usada apenas uma espátula para pressionar o material na forma. No caso da mistura com pedrisco, que demanda uma melhor compactação, foi usada uma vibração intensa, com auxílio de mesa vibratória. Na Tabela 14 é apresentado os resultados desta etapa.

Tabela 14: Resultados de resistência à compressão axial de corpos de prova moldados com brita 1, brita 0 e brita 1 mais 7% de areia.

	Brita 1 (MPa)	Brita 0 (MPa)	Brita 1+ 7% Areia (MPa)
Tipo de vibração	Sem vibração	Mesa vibratória	Sem vibração
CP1	9,2	16,2	3,2
CP2	7,8	19,1	3,5
CP3	7,3	15,2	4,3
CP4	-	20,3	5,5
CP5	-	17,4	5
CP6	-	20,1	4,9
Média	8,10	18,05	4,40
CV (%)	12%	12%	21%

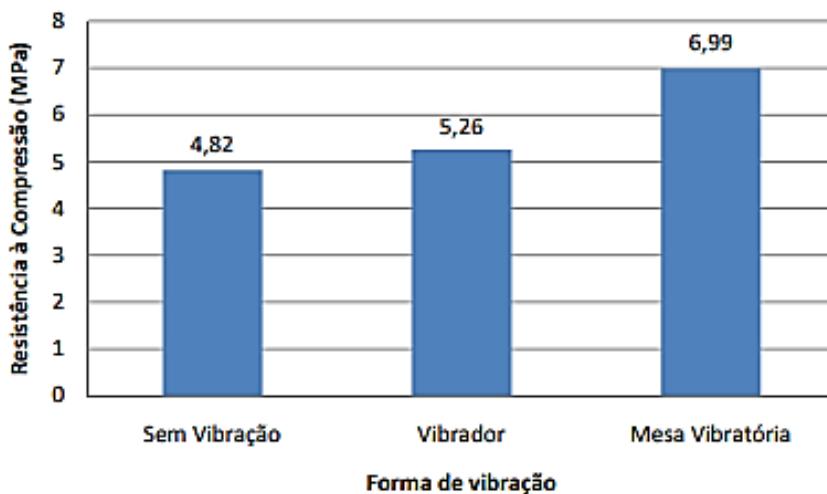
Fonte: Adaptado de Höltz (2011).

Através dos resultados obtidos, os autores notaram que ambas as alternativas melhoraram a resistência. Para os traços com brita 1, sem vibração, o uso de adensamento manual fez com que a pasta não escorresse do agregado. Para o traço com pedrisco (brita 0), onde a mistura fica naturalmente mais seca, o uso da mesa vibratória favoreceu o empacotamento, resultando num marcante incremento de resistência. No entanto, através de observações visuais, isso causou certa obstrução dos poros, o que fez com que essa alternativa fosse descartada. Apesar dos problemas de segregação da pasta, os resultados obtidos em termos de resistência, indicam que pode ser possível associar uma boa resistência à compressão com um bom grau de permeabilidade, se a vibração for realizada adequadamente.

Os dados indicam que ambas as britas podem ser utilizadas, mas a brita 1 apresentou melhores resultados quando combinada com uma pequena quantidade de areia. Isso pode estar

relacionado ao aumento da superfície específico, que auxilia na retenção de água e melhora a hidratação do cimento, impactando positivamente a resistência à compressão. Além disso, o uso de agregados finos e vibração pode favorecer a melhor acomodação dos agregados. Para testar essa hipótese, o autor analisou um traço com $m = 4$, utilizando brita 1 e areia, submetido a três tipos de vibração. Os resultados, apresentados na Figura 30, mostram que a intensificação da vibração melhora a resistência, desde que não ocorra escorramento da massa, o que pode causar uma distribuição irregular no corpo de prova.

Figura 30: Efeitos da forma de vibração na resistência à compressão de traços com $m=4$ e brita 1 com adição de 7% de areia.



Fonte: Höltz (2011).

Para a terceira etapa, o autor comparou os resultados de corpos de prova extraídos e moldados, pois na segunda etapa foi verificado que a extração poderia danificar alguns corpos de prova, afetando a sua resistência. Além disso, na primeira etapa foi verificado que a moldagem em formas cilíndricas não representava de forma adequada a situação de um pavimento de concreto permeável, causando assim problemas de acomodação da brita e o efeito parede. Para a etapa quatro foram comparados os corpos de prova de brita 1 com 7% de areia, moldados em mesa vibratória e adensados com vibrador de agulha. O autor notou que o uso da mesa vibratória reduziu a permeabilidade, que fica na ordem de 200 l/min/m^2 (valor de referência). Os corpos de prova adensados com vibrador de agulha apresentou menor resistência, mas a permeabilidade dobrou, subindo a 497 l/min/m^2 .

O autor relata que, se de fato ocorreu visualmente um acúmulo de pasta nas laterais do corpo de prova devido ao efeito parede, porém, isso não afetou de modo significativo a permeabilidade do material, ao contrário do esperado. Os resultados parecem indicar que o empacotamento menos eficiente conseguido na forma metálica acabou deixando mais vazios, incrementando a permeabilidade, quando não se usou areia. Para a correlação entre a

permeabilidade e a resistência à compressão (MPa), no traço 1:4, à medida que a permeabilidade aumenta a resistência diminui. Já, o traço 1:5, os resultados se mostraram variados, enfatizando assim, a importância da vibração em um pavimento permeável para promover um bom acomodamento da brita, sem que haja a perda da permeabilidade.

Os traços obtidos neste estudo foram adequados para uso em pavimentos com tráfego de pedestres ou veículos leves, mas para viabilizar o uso do material em estacionamentos e vias de tráfego intenso ou composto de veículos pesados. O uso da relação a/c nos extremos da faixa recomendada pelo ACI (2006) ocasionou problemas de trabalhabilidade e/ou resistência; para resistências adequadas deve-se adotar os traços com $m = 4$ e 5 ; o uso da brita 0 (menor diâmetro) favoreceu o empacotamento e apresentou maiores resistências e menor permeabilidade; os custos do concreto permeável são baixos e é uma alternativa viável para pavimentos permeáveis.

Outro estudo que investigou a influência da sílica ativa nas propriedades e na durabilidade do concreto permeável foi o de Adil *et al.* (2020). Inicialmente, foram testadas misturas de massa para avaliar suas propriedades reológicas, considerando diferentes dosagens de sílica ativa (substituindo até 10% do cimento Portland) utilizando agregado de cascalho de rio liso. Em seguida, a pesquisa examinou amostras de concreto permeável com compactação fixa, observando que a trabalhabilidade afetou diretamente o teor de vazios e, consequentemente, o desempenho. Para um controle mais rigoroso, também foram produzidas amostras com teor de vazios fixos (20%), utilizando agregado de cascalho de rio liso e agregado de calcário.

Dessa forma, o programa experimental foi dividido em três componentes: O primeiro foi uma investigação sobre a influência da sílica ativa (SA) na pasta de concreto permeável. O segundo foi a investigação de SA em concreto permeável de cimento Portland (PCPC) produzido com agregado liso com energia de compactação fixa. Em terceiro lugar, o PCPC foi produzido com calcário britado angular e agregados graúdos de cascalho liso de rio e produzido com um teor de vazios fixo, variando ao mesmo tempo os níveis de limpeza do agregado.

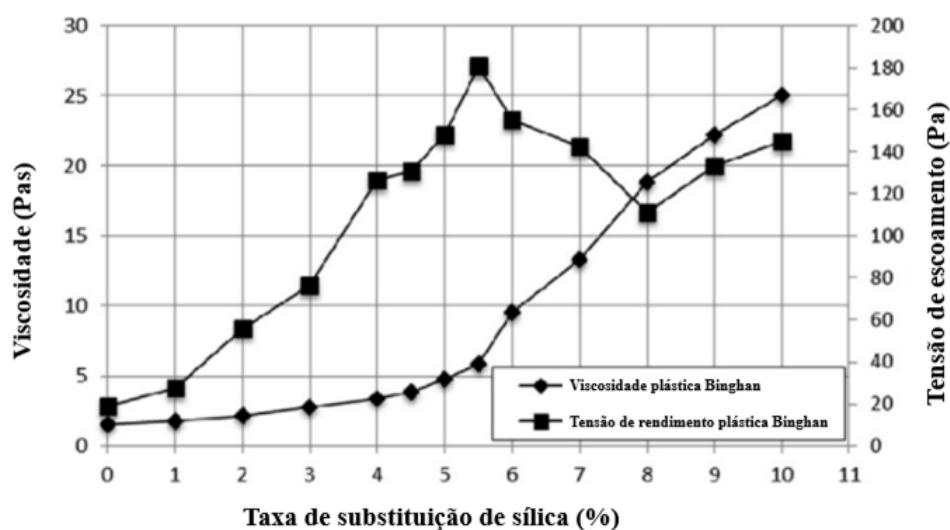
Foi adotado o cimento Tipo I/II em conformidade com a norma ASTM C150 (ASTM, 2012) e sílica ativa (SA) não densificada de grau 920 para evitar problemas de dispersão. Os agregados graúdos incluíram cascalho de rio e calcário, ambos em conformidade com ASTM C33 (ASTM, 2018), com granulometria controlada. Os agregados foram lavados e levados à condição de superfície seca saturada. O agregado miúdo era areia do rio Kansas. Três aditivos foram empregados: resina vinsol para incorporação de ar, controlador de hidratação à base de

ácido fosfónico e redutor de água à base de policarboxilato, todos em conformidade com as normas ASTM.

Ressalta-se que, as misturas seguiram proporções comuns nos EUA, com relação águacimento entre 0,27 e 0,32 e relação material cimentício-agregado (P/A) de 0,24, em conformidade com as diretrizes do ACI e NRMCA. As proporções foram determinadas pelo volume absoluto, mantendo-se iguais devido à mesma massa específica dos agregados (2,59). A reologia foi determinada de acordo com a norma ASTM C1749 (STM, 2017). Os vazios e o peso unitário foram determinados utilizando o ASTM C1754 (ASTM, 2012) e a permeabilidade utilizando uma configuração de cabeça de queda semelhante à apresentada no ACI 522 (ACI, 2010).

Além disso, também foram feitos ensaios de compressão axial, tração e durabilidade. A análise estatística foi realizada pelo teste de Análise de Variância (ANOVA) no Minitab 18 para comparação dos resultados com um valor de p de 0,05 para significância. Para os resultados referentes a investigação de pasta com a avaliação da reologia com taxa de substituição, os autores utilizaram o modelo de Bingham-Plástico para descrever o comportamento do fluido, onde a viscosidade e a taxa de cisalhamento têm uma relação linear após um limite de tensão ser atingida. A Figura 31 representa os resultados reológicos para misturas contendo até 10% de substituição de cimento por SA. O limite de elasticidade aumentou acentuadamente até uma taxa de substituição de SA de 5,5%, seguida de uma diminuição igualmente acentuada. A viscosidade aumentou ligeiramente até a taxa de substituição de SA de 5,5%, seguida de um aumento muito maior.

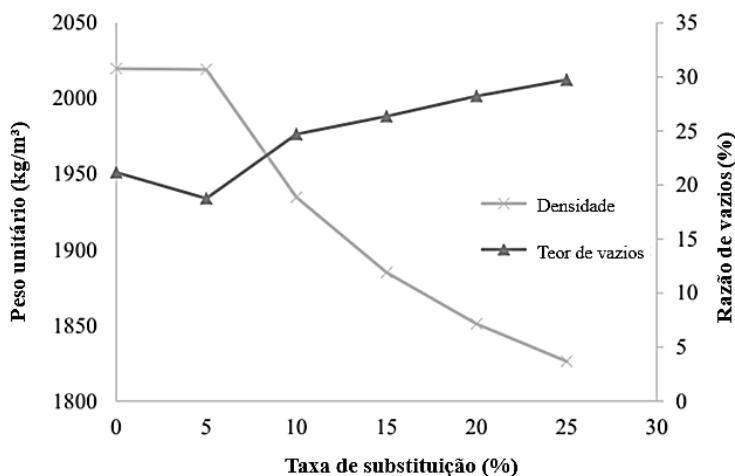
Figura 31: Desempenho reológico para amostras de pasta contendo várias quantidades de sílica ativa.



Fonte: Adil *et al.* (2020).

Os resultados do PCPC de compactação fixa com substituição variável de SA mostram que o teor de vazios diminuiu de 21,2% para 18,8% com a substituição de 5%, proporcionando uma melhoria no empacotamento das partículas. Acima de 5% de substituição, o teor de vazios aumentou, diminuindo a trabalhabilidade (Figura 32). Foi observado um ligeiro aumento da resistência à compressão na substituição de 5%, com um aumento substancial (10%) da resistência à tração à mesma taxa de substituição. O aumento da resistência à compressão com o tempo foi maior para a amostra de 5%, indicando uma reação pozolânica em curso. No entanto, para substituições acima de 10%, houve pouco aumento de resistência, indicando o esgotamento da cal livre. Destaca-se que, a resistência correlacionou-se linearmente com o teor de vazios com R^2 superior a 94% para a resistência à compressão e à tração.

Figura 32: Impacto no teor de vazios da sílica ativa para misturas produzidas usando agregados de rio arredondados.



Fonte: Adaptado de Adil *et al.* (2020).

Em relação à durabilidade, as amostras com 5% de substituição de SA apresentaram melhor desempenho em testes de congelamento e descongelamento em comparação com o controle, mostrando maior resistência e menor teor de vazios. Contudo, amostras com substituições superiores a 5% apresentaram menor durabilidade, falhando após cerca de 150 ciclos devido à redução na densidade e no teor de ar incorporado. Destaca-se que, os espécimes de substituição de 5% falharam apenas devido ao desfiamento externo das partículas, que ocorreu a uma taxa muito reduzida em comparação com as amostras de controlo. As amostras com 10–25% de substituição falhou subitamente com desfiamento externo e interno consistente com misturas que possuíam um sistema de ar deficiente e um contacto intrapartícula reduzido.

O estudo comparou o desempenho de misturas de PCPC com diferentes taxas de substituição de SA, mantendo o teor de vazios constantes (20%) nas amostras. Não houve diferença estatística significativa entre os teores de vazios das amostras, que variaram entre

19,6% e 21,9%. Amostras com 3% e 5% de substituição de SA tiveram melhor trabalhabilidade durante a compactação em comparação com a amostra de controle e a de 7% de substituição. Isto pode estar associado a uma maior tensão de escoamento e a uma menor viscosidade tanto nas amostras de controlo como nas de 7%. Tal como para uma técnica de compactação fixa, o conteúdo de vazios de cada espécime de PCPC foi afetado pela substituição de SA, isto afetou notavelmente o desempenho do PCPC fresco e endurecido.

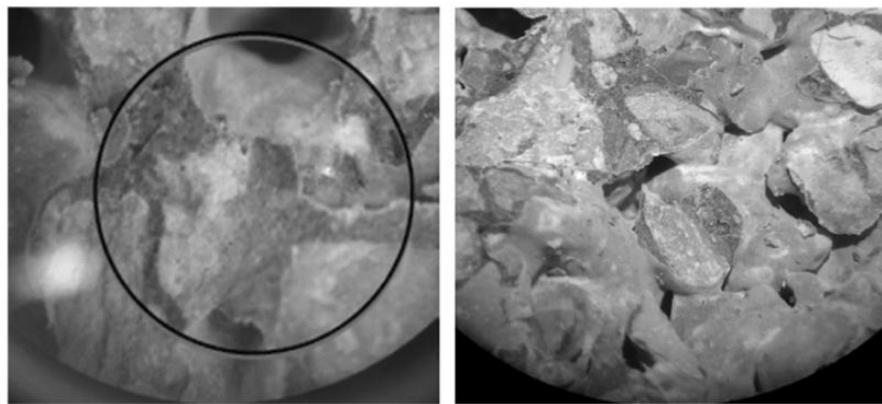
Os resultados de permeabilidade não mostraram diferenças significativas entre os grupos. Em relação à resistência à variação, as amostras de calcário lavado (LS-20) tiveram resistência significativamente superior em todas as taxas de substituição em comparação com as não lavadas (ULS-20). Para a cascata do rio, a tendência foi semelhante, mas as amostras não lavadas com 5% de substituição tiveram maior resistência do que as lavadas. Esses resultados contrastam com as expectativas, indicando que a limpeza dos agregados pode ter um efeito mais importante em agregados lisos do que em agregados angulares. A resistência à abrasão foi melhor com agregados mais angulares e rugosos, diminuindo a maior capacidade do PCPC para resistir a impactos. Na Figura 33 tem-se os provetes após o ensaio com o corpo esférico, à esquerda, tem-se uma amostra com SA e as peças à direita são sem SA. Na Figura 34 tem-se a falha de ligação ITZ da pasta ao agregado de uma amostra de controle à esquerda e a fratura através da pasta e do agregado de uma amostra de 5% à direita.

Figura 33: Produto de cascalho de rio PCPC após 500 revoluções.



Fonte: Adil *et al.* (2020).

Figura 34: Superfície de fratura típica pelo microscópio óptico.



Fonte: Adil *et al.* (2020).

Os autores concluíram que, os ensaios reológicos indicaram que a substituição de 5,5% de SA para cimento foi satisfatória para a trabalhabilidade nas proporções de mistura e dosagens de aditivo fornecidas. Quando a energia de compactação foi fixada e a taxa de vazios pôde variar, observou-se um teor de vazios reduzido em 5% SA, resultando numa maior resistência e durabilidade. Para a substituição de SA excedente aos 5%, as misturas tornaram-se pegajosas, o que resultou num aumento do teor de vazios e na correspondente diminuição da resistência e durabilidade. Quando o índice de vazios foi fixado em 20%, o 3–5% SA mostrou facilidade na compactação e melhoria da resistência à compressão. Foram observados maiores aumentos de resistência em amostras produzidas com agregado graúdo não lavado. A inspeção visual da superfície de falha mostrou uma melhoria na ligação entre a pasta e o agregado quando a SA estava presente.

2.8.4 Resistência mecânica

Mikami (2022) desenvolveu um estudo com o propósito de desenvolver uma metodologia de dosagem que pudesse ser adaptada a diferentes composições granulométricas de agregado graúdo e variações na energia de compactação. A proposta fundamentou-se no conceito de grau de compactação do agregado graúdo, permitindo o controle da porosidade nas misturas de concreto permeável. A abordagem foi aplicada à formulação de 48 misturas com porosidades alvo de 20%, 25% e 30%, abrangendo diferentes combinações de granulometria, adição de agregado miúdo e uso de aditivos superplasticificantes. Com base nesse método, foi possível estabelecer um processo sistemático para controlar as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável por meio do ajuste da porosidade.

As misturas desenvolvidas apresentaram porosidades variando entre 15% e 30%, sendo também propostos modelos de previsão para resistência à compressão, condutividade hidráulica e consumo de cimento em função da porosidade, facilitando a definição de dosagens

otimizadas. A Figura 35 evidencia o modo de ruptura de um corpo de prova com duas camadas de compactação. Nota-se que a ruptura iniciou com uma fissura longitudinal, propagando-se até o centro do corpo de prova, onde se formou um plano de fratura transversal. O autor associa esse comportamento com a variação de porosidade entre as camadas moldadas, limitando a resistência à tração da amostra à camada mais porosa. Observa-se, ainda, diferença na quantidade e no tamanho dos poros entre as camadas, especialmente nas regiões intermediária e inferior.

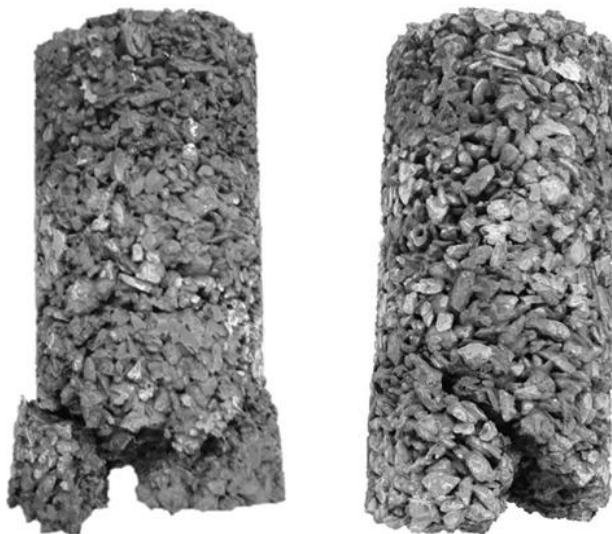
Figura 35: Ruptura à tração indireta e seção de fratura de concreto com duas camadas de compactação.



Fonte: Mikami (2022).

A Figura 36 mostra o padrão de ruptura das amostras submetidas ao ensaio de tração por compressão diametral, moldadas em três camadas. Observa-se que a fratura ocorreu deslocada para a região inferior do corpo de prova, correspondente à primeira camada compactada. O Autor atribui esse comportamento à distribuição vertical da porosidade, que indica maior concentração de poros entre 0 e 5 cm de altura. Apesar da mudança no local de ruptura, não foram observadas variações significativas na resistência mecânica do material.

Figura 36: Ruptura à tração indireta e seção de fratura de concreto com três camadas de compactação.



Fonte: Mikami (2022).

O autor também investigou sobre a porosidade do concreto, fazendo ensaios através de permeâmetros constantes e varáveis. O autor investigou o impacto de diferentes composições granulométricas sobre o desempenho do concreto permeável, buscando compreender três principais aspectos: o efeito do tipo de distribuição granulométrica; a influência do tamanho dos grãos; e, por fim, o comportamento de misturas de diferentes agregados. Para isso, foram empregados dois tipos de agregados de distribuição contínua — pedrisco (P) e brita 1 (B) — ambos provenientes da mesma fonte mineral, diferenciando-se apenas em termos granulométricos.

Além disso, agregados com granulometria uniforme (U) foram obtidos por meio do peneiramento do pedrisco e da brita 1, resultando em três faixas de tamanho comumente utilizadas em concretos permeáveis: 4,75 mm, 6,3 mm e 9,5 mm, conforme referências normativas e bibliográficas. Já para a avaliação de composições com distribuição descontínua (D), o estudo realizou misturas binárias entre as frações de 4,75 mm e 9,5 mm, configuração inspirada em pavimentos asfálticos do tipo SMA (*Stone Matrix Asphalt*). Por fim, foi analisada uma composição formada pela combinação direta de pedrisco e brita 1 (P/B), com o propósito de obter o máximo empacotamento de partículas. As frações granulométricas selecionadas e suas respectivas designações estão detalhadas no Quadro 1.

Quadro 1: Características granulométricas analisadas.

Série	Distribuição	Diâmetro do agregado (mm)	Composição granulométrica
P	Contínua	1,18 a 9,50	Pedrisco
B		4,75 a 12,50	Brita 1
P/B		1,18 a 12,50	50% de pedrisco e 50% de Brita 1
U4	Uniforme	4,75	Material passando na peneira #6,30 e retido na #4,75
U6		6,30	Material passando na peneira #9,50 e retido na #6,30
U9		9,50	Material passando na peneira #12,50 e retido na #9,50
D25	Descontínua	4,75 a 9,5	25% de U4 e 75% de U9
D50			50% de U4 e 50% de U9
D75			75% de U4 e 25% de U9

Fonte: Adaptado de Mikami (2022).

As composições granulométricas são vistas na Tabela 15, onde A é a absorção em porcentagem, ρ^* é a densidade aparente em que se exclui os poros permeáveis a água, S_{sat} é a superfície saturada, S é a densidade do agregado seco. A massa unitária é apresentada no estado solto (E_{Solto}) e compactado ($E_{Compacado}$) bem como o volume de vazios.

Tabela 15: Caracterização dos agregados graúdos utilizados por Mikami (2022).

Série	Densidade			Massa unitária			Índice de volume de vazios	
	A (%)	ρ^* (g/cm ³)	S_{sat} (g/cm ³)	S (g/cm ³)	E_{Solto} (g/cm ³)	$E_{Compacado}$ (g/cm ³)	E_{Solto} (g/cm ³)	$E_{Compacado}$ (g/cm ³)
P	0,66	3,02	2,98	2,96	1,56	1,71	48,49	43,45
B	0,53	3,03	3,00	2,98	1,60	1,78	47,07	41,27
P/B	0,60	3,03	2,99	2,97	1,66	1,79	45,12	40,76
U4	1,00	3,00	2,94	2,91	1,44	1,57	51,89	47,55
U6	0,92	3,03	2,98	2,95	1,45	1,58	52,27	48,02
U9	0,71	3,05	3,01	2,98	1,52	1,67	49,98	45,11
D25	0,96	3,00	2,95	2,92	1,60	1,74	47,39	42,81
D50	0,92	3,03	2,98	2,95	1,61	1,73	46,77	42,81
D75	0,71	3,05	3,01	2,98	1,57	1,70	47,92	43,68

Fonte: Adaptado de Mikami (2022).

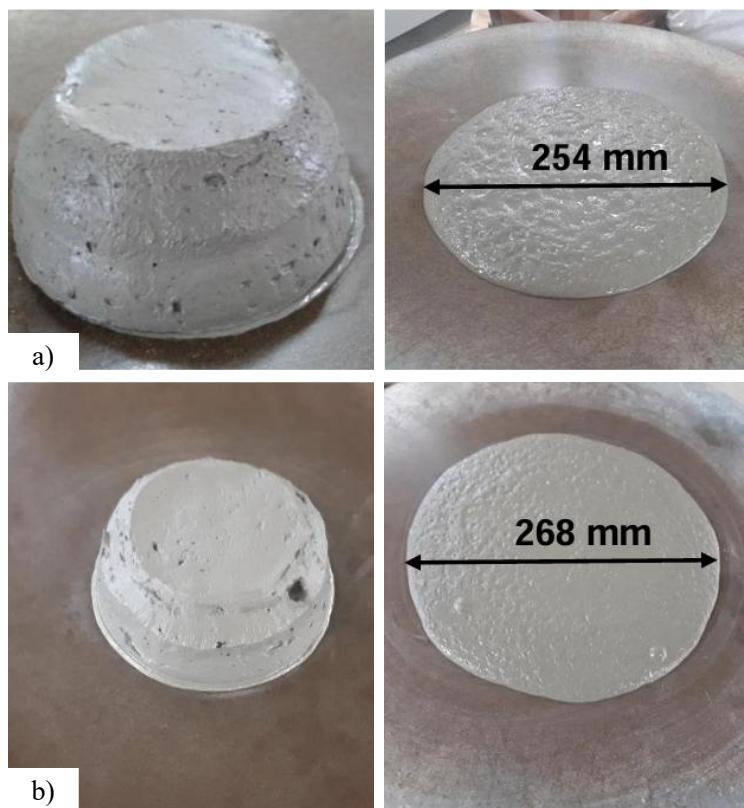
O Autor observou que como os agregados analisados possuem a mesma origem mineralógica, suas densidades aparentes foram semelhantes entre as diferentes composições

granulométricas. Contudo, a absorção de água variou em função do tamanho médio dos grãos, apresentando os maiores valores no agregado U4 (menor fração uniforme utilizada) e os menores na brita 1, composta por partículas de maior dimensão. As propriedades que apresentaram maior variabilidade foram a massa unitária e, por consequência, o volume de vazios — fatores essenciais no processo de dosagem do concreto permeável, já que, aliados ao volume de pasta de cimento, são determinantes para o controle da porosidade do material.

Além disso, notou-se que as frações uniformes (U) exibiram os maiores volumes de vazios, o que justifica sua frequente recomendação na literatura para a produção de concretos permeáveis. Por outro lado, as misturas binárias (D) demonstraram massa unitária mais elevada do que as frações isoladas, comportamento atribuído ao efeito de empacotamento, no qual os grãos menores (4,75 mm) preenchem os vazios entre as partículas maiores (9,5 mm). Esse incremento de massa unitária, entretanto, ocorre até um ponto limite: quando os grãos menores preenchem completamente os espaços intergranulares, passam a substituir os maiores, resultando em uma redução da massa unitária.

Em relação ao método de dosagem, o autor utilizou modelos matemáticos para estimar propriedades como resistência à compressão, condutividade hidráulica e consumo de cimento, todas em função da porosidade. Também foi proposta uma etapa de otimização com foco em porosidade fixa, considerando ajustes na relação a/c e na adição de agregado miúdo. Para garantir a consistência adequada da pasta, foi definido um índice de referência (ICp) de 254 mm. A partir disso, ajustou-se o teor de aditivo superplastificante para manter a consistência dentro da faixa desejada, mesmo em misturas com diferentes proporções de agregado miúdo (20% e 40%). Os ensaios foram conduzidos com cimento CPII F-32 e aditivo à base de policarboxilato, sendo que a mistura ideal apresentou relação a/c de 0,28 e índice de consistência de 268 mm. A Figura 37 mostra a diferença no ensaio de consistência entre a pasta (a) e entre o traço com adição de agregado miúdo (b).

Figura 37: Ensaio de consistência.



Fonte: Adaptado de Mikami (2022).

Nesse contexto, pode-se dizer que a principal contribuição deste estudo foi o desenvolvimento de um método sistemático de dosagem de concreto permeável, capaz de controlar os fatores críticos para seu desempenho: porosidade de projeto, relação a/c e teor de agregado miúdo. Essa abordagem flexível permite o ajuste do traço para diferentes tipos de agregados, métodos de compactação e adições à matriz cimentícia, por meio da determinação experimental do grau de compactação e do índice de consistência padrão. A metodologia proposta elimina a necessidade de ajustes empíricos ou uso de ábacos restritivos, tornando o processo mais preciso e adaptável. A dosagem passa a ser orientada por parâmetros quantificáveis que garantem o desempenho mecânico e hidráulico desejado, promovendo maior eficiência no uso de materiais e controle da porosidade.

Destaca-se ainda, a importância da cura úmida no controle da lixiviação, o uso otimizado da energia de compactação para equilíbrio entre resistência e permeabilidade, e a adequação de diferentes métodos de medição da condutividade hidráulica. A porosidade no estado fresco mostrou-se essencial para o controle das misturas, sendo diretamente relacionada ao desempenho do concreto. Além disso, a seleção dos agregados afeta significativamente o comportamento do material, e a inclusão de agregado miúdo se mostrou vantajosa para evitar consumo excessivo de cimento, sem comprometer a permeabilidade, desde que se controle a

consistência e porosidade. O método proposto oferece base sólida para o ajuste de traços de concreto permeável com desempenho técnico e funcional otimizado.

2.8.6 Aplicação sustentável

O estudo de González-Martínez *et al.* (2025) apresenta o potencial uso sustentável do concreto permeável, uma vez que trata das propriedades dos agregados reciclados de concreto (*recycled concrete aggregates - RCA*) e de pavimento asfáltico (*recycled asphalt pavement - RAP*) para obter as propriedades de diferentes concretos reciclados permeáveis (*permeable recycled concretes - RPC*). Foram avaliadas características como trabalhabilidade, permeabilidade, peso volumétrico, compressão uniaxial e flexão, além de análises microestruturais. Para a fabricação dos corpos de prova de RPC, foram utilizados cimento Portland CPC 30R, água potável, areia sílica (<0,6 mm) e dois tipos de agregados graúdos reciclados: RCA e RAP nos tamanhos 3/8" e 3/4" (9,5 e 19,0 mm, respectivamente). A Figura 38 apresenta a composição, forma e distribuição dos grãos dos agregados utilizados.

Figura 38: Componentes da matriz dos RPCs em estudo: (a) 3/4" RCA; (b) 3/8" RCA; (c) Cimento CPC30R; (d) 3/4" RAP; (e) 3/8" RAP; (f) Areia de sílica menor que a peneira nº 0.



Fonte: González-Martínez *et al.* (2025).

Os autores realizaram os ensaios de caracterização dos agregados reciclados graúdos após amostragem seletiva, com três amostras básicas para cada tamanho. Os resultados dos ensaios físico-mecânicos estão apresentados na Tabela 16. Os autores ressaltaram que o RAP 3/4" apresentou a maior densidade devido à camada de asfalto que o recobre, já que seu tratamento não remove esse material, visando seu uso em projetos rodoviários de baixa densidade. No entanto, nem todo este material é utilizado, havendo alguns remanescentes acumulados.

Tabela 16: Propriedades físico-mecânicas do RA usado para as diferentes misturas de RPC.

Agregado reciclado	Absorção (%)	Peso volumétrico	Desgaste (%)	
		seco compactado (kg/m ³)	Teste de Los Angeles	Microavaliação
3/8" RCA	20,73±12,670	1264,26±16,79	35,62±1,560	37,27±2,350
3/8" RAP	1,97±0,239	1397,61±8,470	33,51±0,710	32,25±1,220
3/4" RCA	8,70±1,706	1587,83±16,770	25,20±1,570	27,21±1,560
3/4" RAP	1,56±0,375	1890,23±2,910	29,34±1,260	24,44±1,970

Fonte: Adaptado de González-Martínez *et al.* (2025).

Ademais, os RCA de 3/8" e 3/4" apresentaram porcentagem de absorção semelhante aos valores registrados nos estudos de Özçelikci & Sahmaran (2023), influenciada pela presença de microporos, mesoporos e macroporos, além de microfissuras geradas na britagem. Já os RAPs de 3/8" e 3/4" tiveram absorção abaixo de 2%, pois a camada de asfalto em sua superfície limita a penetração de água. O, o peso volumétrico dos agregados reciclados é afetado pelo tamanho das partículas e sua composição, sendo menor em agregados menores devido ao aumento de poros e microfissuras. A especificação das misturas foi realizada por meio de um delineamento fatorial completo de dois níveis com três fatores (2³), utilizando o software Minitab 19.1.0.1. Os fatores foram selecionados com base nas diretrizes do guia de concreto permeável 522R-10 do *American Concrete Institute* (ACI). O projeto das misturas resultou em oito variantes (Tabela 17), cada uma produzida em duplicata para os tamanhos de RA (3/8" e 3/4").

Tabela 17: Projeto de misturas.

Variável	a/c	Porosidade (%)	Agregado fino (%)
1	0,26		
2	0,35	15	
3	0,26		0
4	0,35	20	
5	0,26		
6	0,35	15	
7	0,26		10
8	0,35	20	

Fonte: Adaptado de González-Martínez *et al.* (2025).

Os autores adotaram como nomenclatura das misturas o formato MX-XX", onde "M" indica mistura, "X" representa o número da mistura (1 a 8) e "XX"" refere-se ao tamanho do agregado (3/8" ou 3/4"). As misturas de RPC de M1-X/X" a M4-X/X" foram produzidas sem areia de sílica, enquanto as M5-X/X" a M8-X/X" incluíram 10% de areia de sílica. Os autores

relatam que, 100% do volume necessário de agregados graúdos foram substituídos por 50% de RCA e 50% de RAP. Na Tabela 18 é apresentado as quantidades necessárias em kg/m³ de RPC para as diferentes misturas com RA de 3/8" e 3/4".

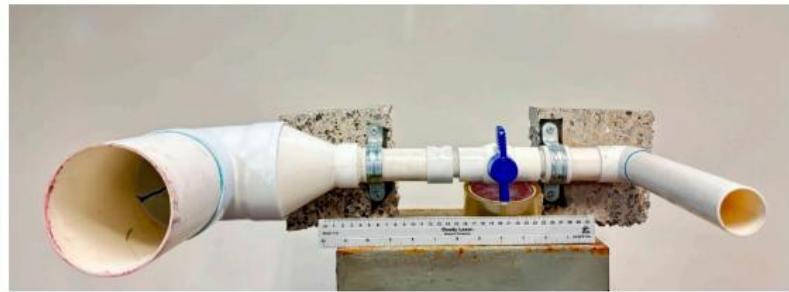
Tabela 18: Composição dos diferentes materiais para mistura do RPC.

Mistura	RCA (kg)	RAP (kg)	Areia de Silica (kg)	Cimento (kg)	Água (l)	ϕ Agregado graúdo (mm)
M1 3/8"				346,34	90,05	
M2 3/8"				260,60	117,27	
M3 3/8"	754,00	624,00	-	173,17	45,02	
M4 3/8"				130,30	58,63	
M5 3/8"				346,34	90,05	9,5
M6 3/8"				260,60	117,27	
M7 3/8"	678,60	561,60	148,50	173,17	45,02	
M8 3/8"				130,30	58,63	
M1 3/4"				346,34	90,05	
M2 3/4"				260,60	117,27	
M3 3/4"	724,75	754,00	-	173,17	45,02	
M4 3/4"				130,30	58,63	
M5 3/4"				346,34	90,05	19,0
M6 3/4"				260,60	117,27	
M7 3/4"	652,27	678,60	148,50	173,17	45,02	
M8 3/4"				130,30	58,63	

Fonte: Adaptado de González-Martínez *et al.* (2025).

Os autores moldaram cilindros de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para ensaio de compressão simples e prismas de (150 × 150 × 500) mm para flexão em três pontos. Após 24 horas, os corpos de prova foram retirados dos moldes e imersos em água para cura até atingirem a idade de 7 e 28 dias para os respectivos ensaios. Os corpos de prova de RPC para os ensaios de compressão foram testados em uma prensa TREVIOLO (modelo YIMC109NC), conforme a norma ASTM C39/C39M-23. Para o ensaio de flexão, as diretrizes da norma ASTM C42/C42M-04 foram seguidas, utilizando uma prensa Tinius Olsen 23.471. No ensaio de permeabilidade, a constante de permeabilidade (k) foi determinada com corpos de prova cilíndricos de (100 x 200) mm, conforme a norma ACI 522R (ACI, 2010).

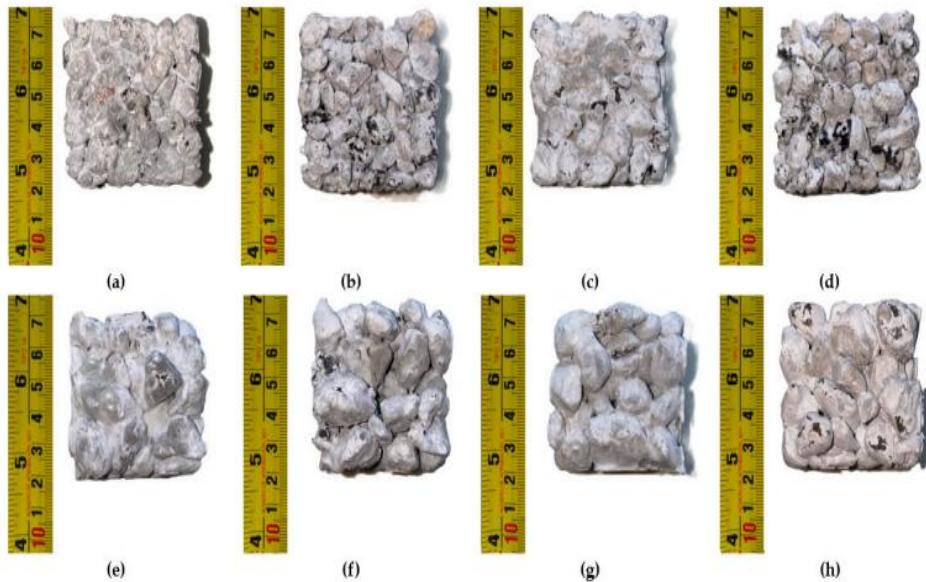
Figura 39: Protótipo de permeâmetro desenvolvido para teste de permeabilidade.



Fonte: González-Martínez *et al.* (2025).

O teste foi realizado usando um permeâmetro de PVC e acrílico (Figura 39), cronometrando o tempo necessário para a água percorrer o circuito após abrir a válvula de corte. Além disso, os autores também realizaram a análise TGA. Para isso, foram selecionadas as amostras M1 3/8", M4 3/8", M5 3/8", M7 3/8", M1 3/4", M4 3/4", M5 3/4" e M8 3/4" (Figura 40), devido à sua relevância nos resultados dos ensaios de resistência à compressão. As misturas selecionadas foram replicadas na fabricação de cubos de 50 × 50 mm, que foram então utilizados no ensaio TGA.

Figura 40 Misturas de RPC selecionadas para o estudo de TGA. (a) M1 3/8"; (b) M4 3/8"; (c) M5 3/8"; (d) M7 3/8"; (e) M1 3/4"; (f) M4 3/4"; (g) M5 3/4"; (h) M8 3/4".



Fonte: González-Martínez *et al.* (2025).

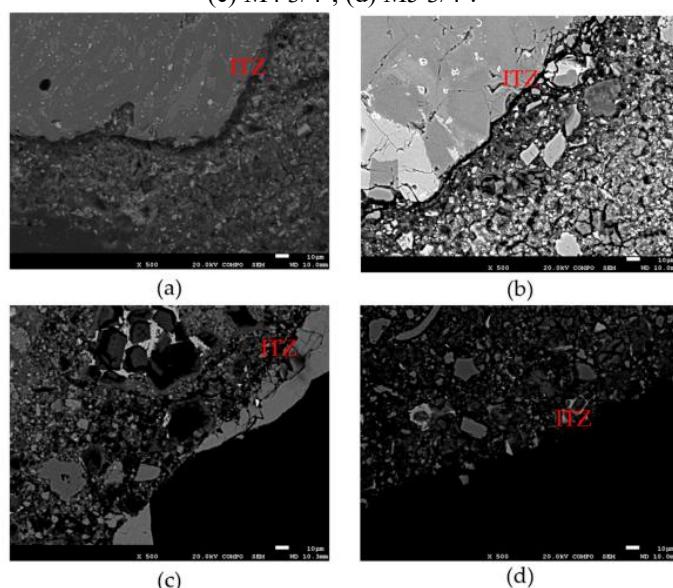
O ensaio de TGA foi realizado no equipamento STA 449 F5 Jupiter (NETZSCH), com duas rampas de temperatura: a primeira de 21 a 500°C (3°C/min) e a segunda de 501 a 1000°C (2°C/min). A resistência à compressão e flexão das diferentes misturas de RPC segue um padrão distinto entre dois grupos: M1 a M4 e M5 a M8. O grupo M5 a M8, que contém areia de sílica, apresenta uma resistência superior, com aumentos de 49% na compressão e 25% na flexão em comparação ao grupo M1 a M4. No entanto, para ambos os grupos, um aumento na porosidade reduz a resistência, com uma porosidade de 15% a 20% resultando em uma queda

de 58% na compressão e 42% na flexão. Além disso, ao modificar a relação a/c de 0,26 para 0,35, observa-se uma redução na resistência, com perdas de 36% na compressão e 33% na flexão, devido à diminuição na capacidade de hidratação do cimento.

Quanto a análise dos resultados de permeabilidade e peso volumétrico, os autores relatam uma relação inversa entre essas propriedades: quanto maior a permeabilidade, menor o peso volumétrico. As misturas M5 3/8" e M6 3/8" apresentam um índice de permeabilidade abaixo do limite estabelecido pelo ACI 522R (2010), devido ao fechamento ou obstrução dos poros responsáveis pela passagem de água. De maneira geral, as misturas atendem aos requisitos de permeabilidade (0,20 a 0,54 cm/s), mas as misturas com agregados de 3/4" apresentam taxas de filtração duas vezes superiores às de 3/8". Além disso, a qualidade da pasta de cimento afeta a permeabilidade: nas misturas que contêm areia silicosa (M5 a M8), a pasta de cimento tende a fechar ou reduzir os poros, resultando em menores taxas de filtração.

Para validar o estudo, os autores utilizaram o ensaio de MEV para observar a matriz das amostras que desenvolveram maior resistência à compressão (M5 3/8" e M5 3/4") versus aquelas com menor resistência (M4 3/8" e M4 3/4"). A Figura 41 mostra a zona de transição interfacial (ITZ) das amostras dessas misturas. No caso de M5 3/8" e M5 3/4", a ITZ possui espessura reduzida, com transição contínua e livre de porosidade excessiva; enquanto no caso das amostras M4 3/8" e M4 3/4", ela é mais espessa, com transição não contínua e maior porosidade. Isso relaciona diretamente a ITZ à capacidade dos RPCs de atingir melhores propriedades mecânicas, estabelecendo o axioma de que quando a ITZ é mais fina, contínua e de baixa porosidade, melhores capacidades mecânicas serão induzidas no RPC.

Figura 41: ITZ das amostras RPC estudadas por Microscopia Eletrônica de Varredura. (a) M4 3/8"; (b) M5 3/8"; (c) M4 3/4"; (d) M5 3/4".



Fonte: González-Martínez *et al.* (2025).

O objetivo principal desta pesquisa foi encontrar uma mistura ideal para alcançar a máxima resistência à compressão. Dessa forma, os resultados mais significativos foram encontrados para as misturas com 3/4" RA, quando a porcentagem de vazios foi mantida em 15%. Com esse valor fixo, foi gerado um gráfico de superfície que revelou que a combinação ideal para atingir a maior resistência à compressão foi com a relação $a/c = 0,26$ e 10% de finos. Os resultados da TGA indicaram uma perda de massa devido à calcinação dos componentes da matriz do RPC. A perda de massa variou entre 10% e 15% para misturas com 3/8" de RA e entre 7% e 14% para misturas com 3/4" de RA. Em suma, o estudo concluiu que o agregado reciclado (RA) é uma opção viável para concreto reciclado permeável (RPC), mas apresenta desafios devido a microfissuras e resíduos, que afetam seu desempenho. A mistura M5 3/4" foi a mais eficaz, com boa porosidade para infiltração de água, ideal para áreas de tráfego leve. Apesar de seus bons resultados, a resistência foi inferior à de estudos anteriores, possivelmente devido a características dos resíduos de construção e demolição.

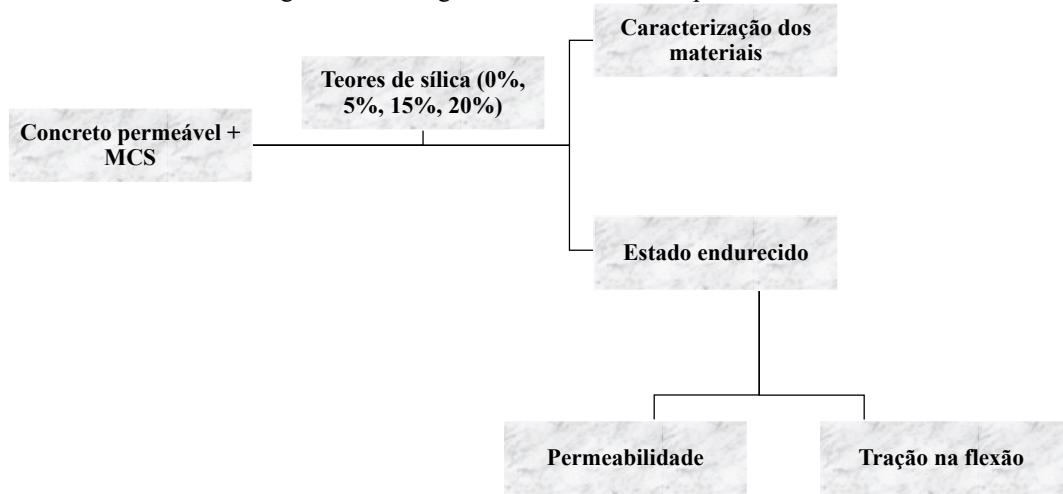
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais

O programa experimental teve como objetivo avaliar o efeito da incorporação de sílica ativa, em diferentes teores (5%, 15% e 20%), no desempenho de concretos permeáveis voltados para aplicações em pavimentos de tráfego leve. Esses teores foram escolhidos com base na literatura, uma vez que valores acima desse intervalo pode haver perda de resistência. Para isso, foram analisadas as influências das características químicas e físicas das blendas cimentícias no desempenho hidráulico e mecânico do material, com foco na potencialidade da sílica ativa na redução do consumo de cimento.

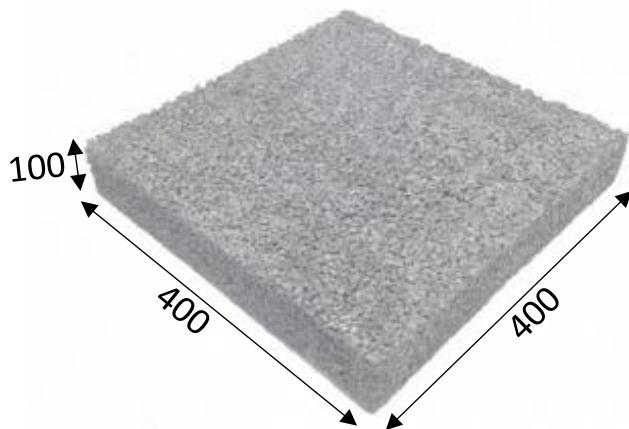
Com base na literatura definiu-se a relação água/cimento utilizada de 0,30 e 0,40, e o teor de pasta foi mantido constante em 30%. O agregado graúdo utilizado apresentou diâmetro médio característico de 19 mm. Ao todo, foram desenvolvidas cinco misturas distintas: duas de referência (sem adição de sílica ativa) e três contendo diferentes proporções MCS. Para a realização dos ensaios no estado endurecido, foram moldadas placas de concreto permeável com dimensões de 400 × 400 × 100 mm, as quais, após o período de cura, foram seccionadas em prismas com medidas de 400 × 100 × 100 mm. A Figura 42 mostra o resumo do programa experimental e a Figura 43 apresenta as dimensões dos blocos confeccionados.

Figura 42: Fluxograma das atividades experimental.



Fonte: Autor (2025).

Figura 43: Dimensões dos blocos.



Fonte: Autor (2025).

3.2 Materiais

3.2.1 Cimento e Sílica Ativa

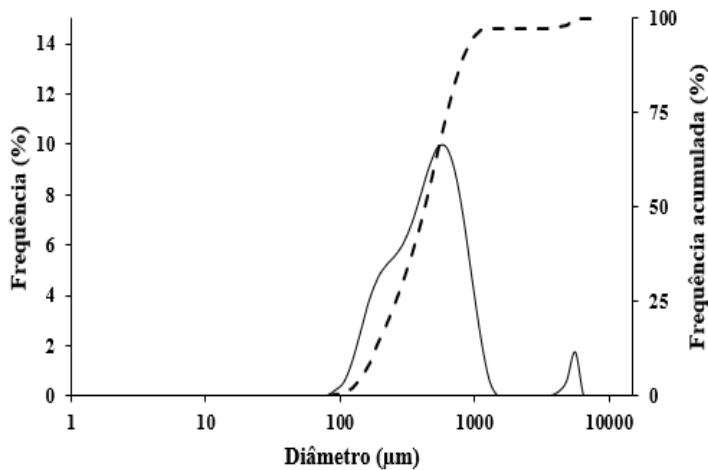
Optou-se por utilizar o Cimento Portland CP II F 32, pela composição básica de 11% a 25% de material carbonático, o que significa materiais finamente divididos, constituídos em sua maior parte de carbonato de cálcio e menor calor e hidratação, conforme observado na NBR 16697 (ABNT, 2018). Como material cimentício suplementar, foi utilizado sílica ativa, com massa específica de 2,07 g/cm³, obtido pela NBR 16605 (ABNT, 2017). Se tratando de concreto permeável, no qual a relação água/cimento é inferior a concretos convencionais, é importante que se tenha menor calor de hidratação da pasta de cimento, com o objetivo de evitar o surgimento de pequenas fissuras. A Tabela 19 mostra as principais propriedades do material fornecidos pelo fabricante e os mesmos parâmetros obtidos por ensaios de caracterização. A distribuição granulométrica da sílica ativa é apresentada na Figura 44 e a Figura 45 mostra o material usado.

Tabela 19: Propriedades físicas e químicas do cimento CP II F 32.

CP II F 32	Fabricante	Experimental
Massa específica g/cm ³	-	2,93
Tempo de início de pega h/min	>1	3
Tempo de fim de pega h/min	<6	5
Resistência à compressão 7 dias MPa	>20	22
Resistência à compressão 28 dias MPa	>32	33

Fonte: Autor (2025).

Figura 44: Distribuição granulométrica da sílica ativa utilizada.



Fonte: Autor (2025).

Figura 45: Sílica ativa.



Fonte: Autor (2025).

3.2.2 Agregados

O agregado graúdo empregado nesta pesquisa foi o seixo médio, amplamente comercializado na região. Para a caracterização física do material, foram realizados os ensaios de composição granulométrica, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 17054 (ABNT, 2022), bem como os ensaios de massa específica, massa unitária, índice de vazios e absorção de água, de acordo com a NBR 16917 (ABNT, 2021). Para que se tivesse um diâmetro adequado e contínuo, foram misturados seixos com diâmetro característico variando entre 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3mm, 4,75 mm e 2,36 mm. Esses ensaios forneceram os dados iniciais necessários para a etapa preliminar da dosagem dos concretos permeáveis. A Figura 46 mostra o material empregado.

Figura 46: Seixo médio utilizado.



Fonte: Autor (2025)

A Tabela 20 apresenta a distribuição granulométrica do agregado graúdo utilizado. Ressalta-se que o seixo apresenta forma predominantemente arredondada e superfície relativamente lisa, características que podem influenciar negativamente na aderência da pasta cimentícia e na interconectividade dos poros. Tais aspectos morfológicos são relevantes, pois afetam diretamente a compacidade do esqueleto granular e, consequentemente, a permeabilidade e a resistência mecânica do concreto permeável.

Tabela 20: Distribuição granulométrica do seixo médio.

Peneira (mm)	Massa (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)	Norma
25,00	0	0	0	
19,00	0	0	0	
12,50	49,3	33	33	
9,50	31,1	21	54	
6,30	34,1	23	77	
4,75	29,6	20	97	
2,40	5,9	3	100	
1,20	0,0	0	100	
0,60	0,0	0	100	
0,30	0,0	0	100	
0,15	0,0	0	100	
Fundo	0,0	0	100	

DMC: 19,00 mm

MF: 6,51

Fonte: Autor (2025).

3.2.3 Água

A água utilizada para a produção das misturas foi fornecida pela companhia de saneamento local. De acordo com informações da própria concessionária, o pH da água distribuída na região varia entre 5,0 e 5,5.

3.3 Dosagem do concreto

A preparação das misturas de concreto permeável neste estudo seguiu os tempos e as etapas de mistura propostas por Braga (2019). A produção foi realizada utilizando um misturador de eixo inclinado com capacidade de 200 litros. Inicialmente, 100% do agregado graúdo foi introduzido no misturador, seguido do lançamento de 30% da massa total de água, com o objetivo de umedecer a superfície dos grãos. A mistura foi então rotacionada por 15 segundos. Na sequência, 100% do cimento foi adicionado e o sistema novamente rotacionado por mais 30 segundos. Por fim, o restante da água foi incorporado, e a mistura manteve-se em agitação por mais 60 segundos, sendo possível observar na Figura 47 a textura de uma das misturas utilizadas.

Figura 47: Mistura do traço CPER30SA5.



Fonte: Autor (2025).

Para evitar a perda de trabalhabilidade nas misturas contendo sílica ativa, foi adicionado um aditivo superplastificante, que contribuiu para manter a consistência adequada sem

aumento do teor de água. Ressalta-se que, conforme esperado para concretos permeáveis, as misturas apresentaram *slump* igual a zero, característica típica desse tipo de material, cuja baixa fluidez visa preservar a interconectividade dos vazios. Além disso, foi possível observar que as misturas apresentaram uma coesão satisfatória, compatível com a aplicação em pavimentos permeáveis, garantindo estabilidade durante o processo de moldagem e compactação. A Tabela 21 apresenta os traços utilizados, mostrando os teores de sílica, de pasta, agregados, cimento e água.

Tabela 21: Traços utilizados na pesquisa.

	SA (%)	<i>a/c</i>	Teor de pasta (%)	Cimento (kg/m ³)	SA (kg/m ³)	Agregado (kg/m ³)	Água (kg/m ³)
CPER30	0			416,8	0		133,4
CPER30SA 5	5	0,30		396,0	20,8		145,9
CPER30SA 20	20		30	333,4	83,4	1569,7	145,9
CPER40	0			416,8	0		133,4
CPER40SA 15	15	0,40		354,3	62,5		145,9

Fonte: Autor (2025).

Após o preparo, o concreto foi lançado nos moldes para o processo de adensamento, como pode ser visto na Figura 48. Conforme a metodologia adaptada por Braga (2019) e com base no estudo de Castro *et al.* (2009), as misturas foram espalhadas em moldes metálicos e compactadas com o auxílio de um rolo metálico de 55 kg, disponível no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará. Para simular uma pressão de compactação equivalente a 0,08 MPa, o rolo foi aplicado sobre os corpos de prova em uma única camada, por meio de 14 movimentos de vai-e-vem.

Figura 48: Lançamento e adensamento com uso de rolo metálico em CP, respectivamente.



Fonte: Autor (2025).

Após o adensamento, as amostras permaneceram em cura ao ar nos moldes por 48 horas, como visto na Figura 49. Em seguida, foram desmoldadas e submetidas à cura submersa em reservatório de água por 28 dias. Finalizado esse período, os corpos de prova foram retirados e deixados secar ao ar por 24 horas antes da realização dos ensaios. Além disso, foi possível identificar a ocorrência de um discreto efeito parede, caracterizado por uma leve diferença na densidade e na textura superficial entre as regiões próximas às paredes dos moldes e o núcleo das amostras. Tal fenômeno é típico em concretos permeáveis moldados em formas rígidas.

Figura 49: Processo de cura dos blocos.



Fonte: Autor (2025).

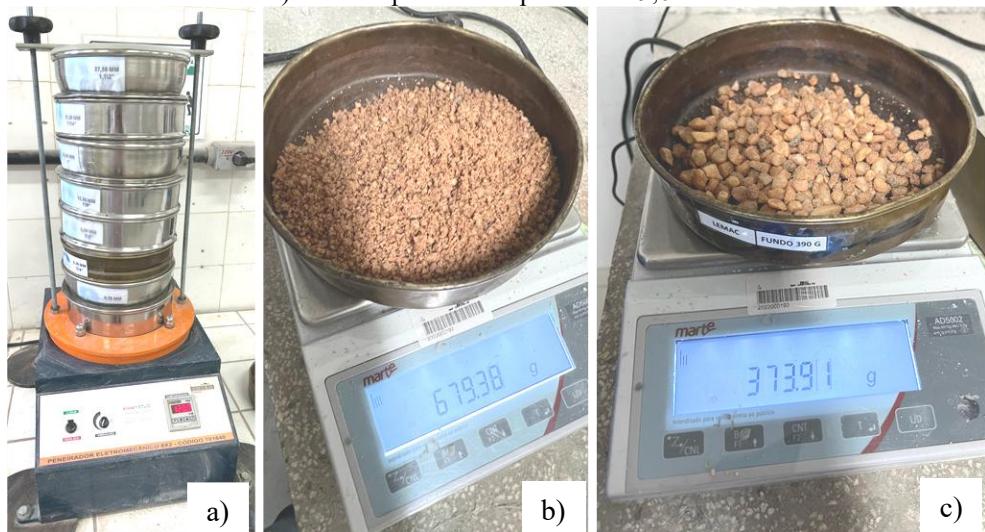
3.4 Ensaios realizados

3.4.1 Caracterização dos materiais

Os agregados graúdos utilizados neste estudo foram caracterizados por meio de ensaios normativos, conforme estabelecido pelas normas da ABNT. A composição granulométrica foi determinada segundo a NBR 17054 (ABNT, 2022), por meio de peneiramento em série com peneiras padronizadas. Esse ensaio permitiu avaliar a distribuição do tamanho das partículas, um fator fundamental para garantir uma estrutura granular adequada ao concreto permeável,

com vazios interconectados que favoreçam a permeabilidade. A Figura 50 mostra as peneiras e material utilizado como agregado graúdo e a Tabela 22 apresenta a distribuição dele.

Figura 50: Ensaio de granulometria – a) peneirador adotado; b) material passante na peneira # 9,5 mm, c) material passante na peneira # 19,0 mm.



Fonte: Autor (2025).

Tabela 22: Distribuição granulométrica do agregado graúdo.

Peneira (mm)	Massa (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)	Norma
25,00	0	0	0	
19,00	0	0	0	
12,50	49,3	33	33	
9,50	31,1	21	54	
6,30	34,1	23	77	
4,75	29,6	20	97	
2,40	5,9	3	100	
1,20	0,0	0	100	
0,60	0,0	0	100	
0,30	0,0	0	100	
0,15	0,0	0	100	
Fundo	0,0	0	100	
DMC: 19,00				NBR 17054 (2022)
MF: 7,61				

Fonte: Autor (2025).

Adicionalmente, foram realizados os ensaios de determinação da massa específica, massa unitária, conforme os procedimentos da NBR 16917 (ABNT, 2021), com resultados de $3,07 \text{ g/cm}^3$ e 1150 g/cm^3 , respectivamente. Esses ensaios permitiram estimar a densidade real dos grãos, a compactação natural dos agregados em um recipiente padrão, o volume de vazios existente entre as partículas e a capacidade de absorção de água. Essas propriedades físicas são essenciais para o correto dimensionamento da mistura e para a previsão do comportamento do

concreto no estado endurecido. Na Figura 51 pode ser visto o processo de determinação do peso específico do cimento e sílica ativa.

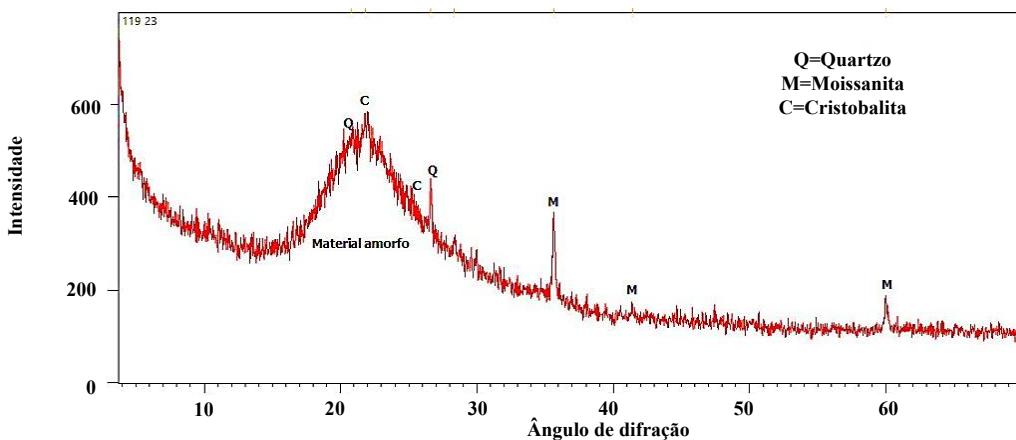
Figura 51: Ensaio de massa específica – a) cimento e b) sílica ativa.



Fonte: Autor (2025).

O ensaio de Difração de Raios X (DRX) foi empregado especificamente para a caracterização mineralógica da sílica ativa utilizada nas misturas. A técnica permitiu identificar qualitativamente as fases cristalinas presentes no material, como quartzo e cristobalita, além de verificar a presença de frações amorfas. A análise foi conduzida com amostra pulverizada, submetida a feixes de raios X, gerando um padrão de difração que reflete a estrutura interna do material. Essa identificação é fundamental para avaliar o potencial pozolânico da sílica ativa, uma vez que a reatividade do material está diretamente relacionada à proporção de fases amorfas, mais propensas a reagirem com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento. A Figura 52 mostra o gráfico de contagem em função do ângulo de difração (2θ), obtido com radiação de cobre ($\text{Cu-K}\alpha$), referente à análise da sílica ativa por DRX.

Figura 52: Gráfico de contagem em função do ângulo de difração.



Fonte: Autor (2025).

3.4.2 Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade dos corpos de prova foi realizado conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 16605 (ABNT, 2017), que trata da determinação do desempenho hidráulico de concretos permeáveis. Inicialmente, as amostras foram preparadas com dimensões padronizadas e devidamente saturadas, permanecendo submersas em água por no mínimo 24 horas. Esse processo é fundamental para garantir que todos os poros estejam preenchidos, evitando interferências nos resultados do escoamento. Após a saturação, os corpos de prova foram posicionados em um dispositivo denominado permeâmetro de carga variável. O sistema consiste em um tubo vertical acoplado sobre a amostra (Figura 53), por onde se aplica uma coluna de água com altura inicial conhecida. É essencial que as laterais do dispositivo estejam vedadas adequadamente, de modo a garantir que a água escorre exclusivamente pela seção transversal do concreto.

Figura 53: Permeômetro para carga variável.



Fonte: Autor (2025).

Com o sistema montado, foi adicionada água até a altura inicial desejada, e, em seguida, iniciou-se a cronometragem. Durante o ensaio, registrou-se o tempo necessário para que a altura da coluna de água diminuisse de um nível inicial (h_1) para um nível final (h_2). Com base nesses dados e nas dimensões do equipamento e das amostras, foi possível calcular o coeficiente de permeabilidade, que expressa a capacidade do concreto em permitir o escoamento de água através de sua estrutura porosa. O procedimento foi repetido pelo menos três vezes para cada traço de concreto, a fim de garantir a reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados. A Figura 54 mostra o procedimento aplicado para a medição da condutividade hidráulica.

Figura 54: Procedimento para medição do desempenho hidráulico.



Fonte: Autor (2025).

3.4.3 Ensaio de tração na flexão

O ensaio de tração na flexão foi conduzido com o intuito de determinar a resistência à tração dos concretos permeáveis por meio da aplicação de cargas em três pontos, conforme preconiza a NBR 12142 (ABNT, 2010). Os corpos de prova foram moldados em formato prismático, com dimensões de 400 mm de comprimento, 100 mm de largura e 100 mm de altura, obtidos a partir do corte das placas moldadas inicialmente com $400 \times 400 \times 100$ mm. Após o período de cura submersa de 28 dias, os prismas foram retirados do reservatório, deixados em ambiente laboratorial por 24 horas e, em seguida, submetidos ao ensaio. A Figura 55 mostra um prisma antes da realização do ensaio.

Figura 55: Prisma para ensaio de tração na flexão.



Fonte: Autor (2025).

O procedimento consistiu na colocação do corpo de prova sobre dois apoios metálicos com vão livre de 300 mm, distribuídos simetricamente. A carga foi aplicada no centro do vão, de forma gradual e contínua, até a ruptura da amostra, utilizando prensa hidráulica dotada de célula de carga e sistema de aquisição de dados. A velocidade de aplicação foi mantida conforme especificado pela norma, visando garantir uma taxa de carregamento constante e representativa do comportamento do material. A Figura 56 mostra o espécime após a ruptura.

Figura 56: Prisma rompido após o ensaio.



Fonte: Autor (2025).

A resistência à tração na flexão ($f_{ct,fl}$) foi calculada a partir da carga máxima registrada no momento da ruptura, por meio da Eq. 2:

$$f_{ct,fl} = \frac{(3 \cdot F \cdot L)}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad \text{Eq. 2}$$

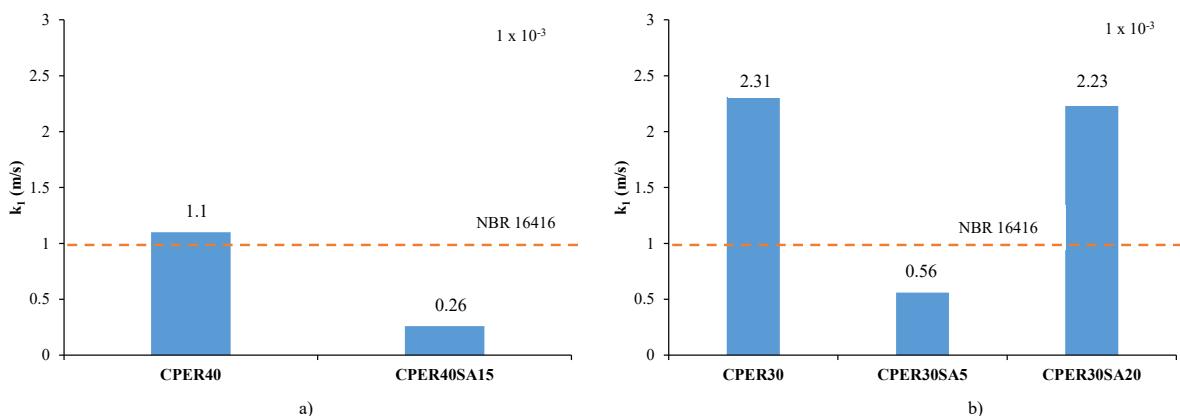
onde F é a carga máxima (N), L é o vão entre apoios (mm), b é a largura (mm) e h é a altura da seção transversal do corpo de prova. O resultado obtido permite avaliar a capacidade do concreto em resistir a tensões de tração indiretamente induzidas, sendo uma propriedade fundamental para a análise estrutural de elementos submetidos a flexão, como pavimentos e placas submetidas a tráfego leve.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1.1 Efeito MCS na permeabilidade de Concretos Permeáveis

A figura 55 apresenta o comportamento de concretos permeáveis com e sem sílica ativa. Os resultados apontam que todas as misturas sem MCS atenderam os padrões normativos de permeabilidade, porém a inserção de MCS impactou na permeabilidade, levando em alguns casos a redução. Ressalta-se os valores apresentados nos gráficos são valores médios.

Figura 57: Resultados de permeabilidade do concreto (a) família 0,40 e (b) família 0,30.



Fonte: Autor (2025).

A análise dos resultados de permeabilidade demonstrou que as misturas CPER30 e CPER30SA20 apresentaram os melhores desempenhos hidráulicos, com coeficientes de permeabilidade de $2,31 \times 10^{-3}$ m/s e $2,23 \times 10^{-3}$ m/s, respectivamente. Esses valores correspondem a ganhos de 131% e 123% em relação ao valor mínimo de referência definido pela NBR 16416 ($1,0 \times 10^{-3}$ m/s), evidenciando uma estrutura porosa altamente conectada, favorável ao escoamento de água. A amostra CPER40 também superou a exigência normativa, com $1,10 \times 10^{-3}$ m/s, o que representa um ganho de 10%. Apesar de não atingir os mesmos patamares das amostras anteriores, ainda demonstra um desempenho satisfatório como concreto permeável.

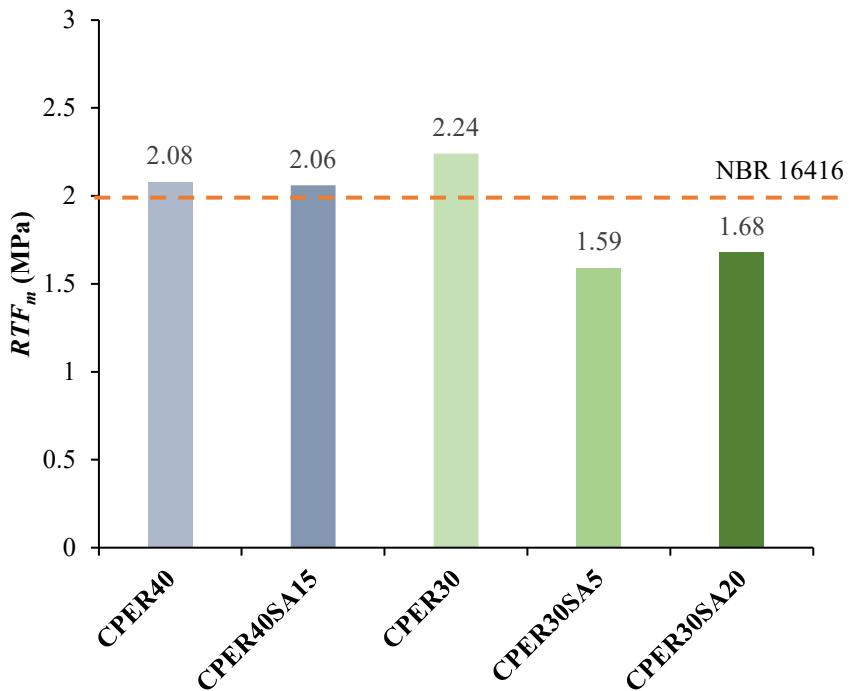
Para a mistura CPER30SA20, o elevado valor de permeabilidade pode ser atribuído à formação predominante de poros abertos e interconectados, que facilitam a passagem da água, em contraste com a presença de poros isolados, que, embora contribuam para o volume total de vazios, não permitem fluxo efetivo. Assim, mesmo com a adição de 20% de sílica ativa — que teoricamente poderia densificar a matriz —, a mistura apresentou porosidade efetiva elevada,

possivelmente em razão de falhas no empacotamento ou segregação localizada, resultando em canais contínuos que aumentaram significativamente a condutividade hidráulica.

Em contrapartida, as misturas com adição de sílica ativa em menores proporções apresentaram desempenho significativamente inferior. A amostra CPER30SA5 atingiu um coeficiente de $0,56 \times 10^{-3}$ m/s, o que representa apenas 56% do valor de referência, configurando uma redução de 44% em relação à norma. Já a CPER40SA15 apresentou o menor valor entre todas as amostras, com $0,26 \times 10^{-3}$ m/s, correspondente a apenas 26% do exigido, ou seja, uma redução de 74%. Esses resultados sugerem que a incorporação da sílica ativa, possivelmente em conjunto com a maior presença de finos ou aumento da compacidade interna da matriz, levou à obstrução dos poros e à perda da conectividade entre os vazios. Bediako *et al.* (2019) e Park *et al.* (2015) também reportaram que pequenas adições de sílica ativa, quando não cuidadosamente dosadas, podem resultar em redução significativa da permeabilidade devido à obstrução parcial dos canais de fluxo. Assim, o comprometimento observado neste estudo reforça a necessidade de otimização criteriosa da dosagem e do teor de adições minerais para garantir o desempenho hidráulico desejado.

Para a estimativa da resistência à tração na flexão (RTF), foram moldados e ensaiados quatro prismas de cada traço experimental. A Figura 58 apresenta o gráfico com os valores médios de resistência à tração na flexão (RTF_m) para cada mistura, permitindo a análise do comportamento mecânico dos concretos permeáveis em relação ao limite mínimo estabelecido pela NBR 16416 (2015), que é de 2 MPa para aplicações em pavimentos de tráfego leve. Observa-se que as misturas CPER30 e CPER40 superaram esse valor de referência, alcançando resistências médias de 2,24 MPa e 2,08 MPa, respectivamente. Esses resultados indicam a adequação das referidas misturas para o uso em pavimentação permeável, atendendo aos requisitos normativos.

Figura 58:RTF Média Comparada à NBR 16416



Fonte: Autor (2025).

Entre os traços com adição de sílica ativa, a mistura CPER40SA15 ($a/c = 0,40$) destacou-se ao atingir 2,06 MPa, o que representa um acréscimo de 3% da exigência normativa. Esse resultado mostra que, mesmo com substituição parcial do cimento, é possível alcançar desempenho mecânico compatível com os requisitos normativos. A resistência obtida por CPER40SA15 é apenas 2% inferior à CPER40 e 8% inferior à CPER30, o que indica um bom equilíbrio entre redução de cimento e manutenção das propriedades estruturais. Já os traços CPER30SA5 e CPER30SA20, ambos com relação a/c de 0,30 e substituições de 5% e 20% de sílica ativa, respectivamente, apresentaram desempenhos mecânicos inferiores.

A amostra CPER30SA5 obteve resistência à tração na flexão de 1,59 MPa, representando uma redução de 20% em relação ao valor mínimo exigido pela NBR 16416 (2015) e de 29% em comparação com o traço CPER30, enquanto CPER30SA20 atingiu 1,68 MPa, correspondendo a 16% abaixo da exigência normativa e 25% inferior à referência CPER30. Esses resultados indicam que, embora a sílica ativa apresente potencial pozolânico, sua dosagem inadequada pode comprometer a resistência mecânica do concreto permeável. A redução observada pode ser atribuída à formação de poros isolados, decorrente da má dispersão da sílica em pequena dosagem, e à dificuldade de adensamento associada à baixa relação

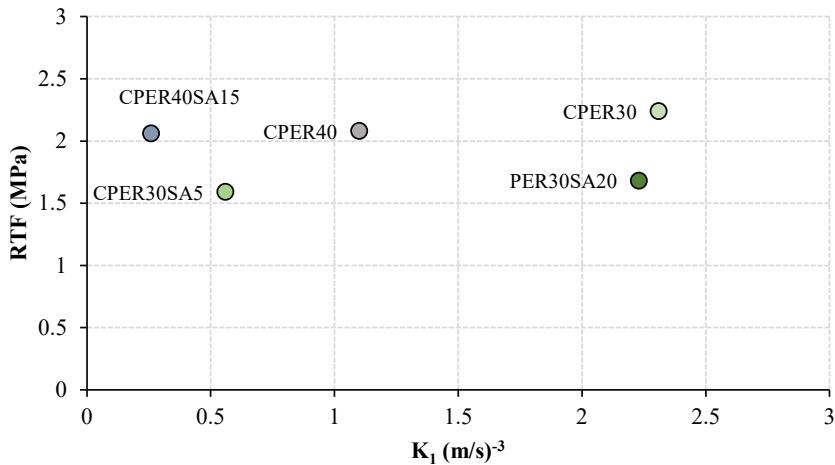
água/cimento, fatores que favorecem a presença de vazios não conectados e heterogeneidade na matriz cimentícia.

Além disso, em teores reduzidos, a sílica ativa pode não gerar reação pozolânica suficiente para compensar a diminuição do teor de cimento, resultando em matriz menos densa e menos coesa. De acordo com Siddique (2011), a adição excessiva ou mal dosada de materiais pozolânicos pode modificar a microestrutura do concreto de forma prejudicial, aumentando a quantidade de finos e interferindo na formação de uma matriz homogênea, impactando negativamente a resistência final do material.

Mehta & Monteiro (2014) ressaltam que o uso inadequado de adições minerais pode reduzir a resistência mecânica, principalmente em concretos com elevada porosidade ou com deficiências no empacotamento granular. De modo geral, os resultados demonstram que a adição de sílica ativa pode contribuir para o desempenho do concreto permeável, desde que utilizada em proporções adequadas. O traço CPER40SA15 revelou-se o mais equilibrado entre sustentabilidade e desempenho mecânico, enquanto os traços CPER30SA5 e CPER30SA20 indicaram que teores muito baixos ou muito altos de substituição comprometem significativamente a resistência à tração na flexão.

Com base na Figura 59, nota-se que as amostras CPER30 e CPER30SA20 destacaram-se por exibirem os maiores valores de permeabilidade (K_1), acima de $2,0 \times 10^{-3}$ m/s, com CPER30 mantendo resistência superior a 2 MPa, enquanto CPER30SA20 apresentou resistência mais baixa, em torno de 1,68 MPa, evidenciando a formação de poros abertos que favoreceram o escoamento, mas reduziram a coesão da matriz. Por outro lado, CPER40 e CPER40SA15 apresentaram combinações mais equilibradas, com permeabilidade moderada e resistência próxima ou ligeiramente acima do limite normativo, sugerindo que, mesmo com a maior relação água/cimento, foi possível manter desempenho mecânico satisfatório. A amostra CPER30SA5, embora tenha apresentado resistência inferior (1,59 MPa), exibiu baixa permeabilidade, indicando provável presença de poros isolados que não contribuíram para a drenagem e comprometeram a resistência.

Figura 59: relação entre RTF x K_1 .



Fonte: Autor (2025).

4.2 Análise de viabilidade ambiental e econômica

Comparando ao concreto convencional pode-se observar que a adição de sílica ativa ameniza o impacto ambiental da emissão de CO₂ e o consumo de energia. A Tabela 23 reúne os consumos de sílica e cimento de cada mistura, bem como o impacto energético e emissão de gases poluentes associados. O incremento da adição mineral reduziu o impacto energético das misturas, e a emissão de gases poluentes foi até 18% menor, para 20% de incremento de sílica ativa. Dessa forma, a composição de CP20 pode ser uma estratégia eficiente para pavimentação permeável no tráfego de uso de pedestres, atrelada a sua característica de viabilidade ambiental. Corroborando com esse achado, o estudo de Conto *et al.* (2014) evidenciou que a adição de Sílica Ativa possibilitou substituir o cimento na fabricação do concreto visando à redução da emissão de CO₂ na atmosfera.

Tabela 23: Consumo energético dos traços desenvolvidos.

	SA (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Impacto energético (MJ/ton)	Emissões de CO ₂ (kg/m ³)
CPER30 e CPER40	0	417	2109,2	346
CPER30SA5	21	396	2058,8	333
CPER30SA20	83	333	1802,1	285
CPER40SA15	63	354	1887,8	301

Fonte: Autor (2025).

É possível perceber que mesmo pequenas incorporações de sílica ativa já resultam em melhorias ambientais. Por exemplo, a mistura CPER30SA5, com apenas 5% de sílica ativa, apresenta uma redução de 50,4 MJ/ton no impacto energético (cerca de 2,4%) e 13 kg/m³ a menos de emissão de CO₂ (3,8%) em relação à CPER30 e CPER40. Os ganhos tornam-se mais expressivos com o aumento da proporção de sílica ativa: CPER40SA15 e CPER30SA20 apresentam reduções de 221,4 MJ/ton (10,5%) e 307,1 MJ/ton (14,6%), respectivamente, além de diminuírem as emissões de CO₂ em 45 kg/m³ (13%) e 61 kg/m³ (17,6%).

Tabela 24: Custo por m³ das misturas apresentadas.

	Ag. Graúdo (kg/m ³)	SA (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Cimento (R\$/kg)	Ag. Graúdo (R\$/kg)	SA (R\$/kg)	Total (R\$/m ³)
CPER30 e CPER40	1570	0	417				650,43
CPER30 SA5	1570	21	396	1,20	0,10	7,00	795,65
CPER30 SA20	1570	83	333				1.158,73
CPER40 SA15	1570	63	354				1.037,51

Fonte: Autor (2025).

A Tabela 24 apresenta a composição detalhada dos materiais utilizados nas misturas, os custos unitários de insumos e o custo total estimado por metro cúbico de concreto, de acordo com dados disponíveis nas planilhas disponibilizadas no endereço eletrônico da Secretaria de Estado de Obras Públicas do Pará. Ressalta-se que dentre os custos estão inclusos o valor do aditivo (R\$ 19,00/L) e o consumo de água, de aproximadamente R\$ 143,00 por m³. Observa-se que, embora o concreto de referência (CPER30 e CPER40) apresente o menor custo (R\$ 650,43/m³), as misturas com sílica ativa têm custos crescentes conforme aumenta o percentual do material suplementar. A mistura CPER30SA20 atingiu o custo mais elevado (R\$ 1.158,73/m³), influenciado diretamente pelo preço da sílica ativa (R\$ 7,00/kg) e pela maior quantidade de cimento e aditivo.

Apesar do custo superior, é importante considerar os benefícios técnicos e ambientais dessas misturas. O concreto permeável com sílica ativa, além de oferecer melhor desempenho mecânico e maior durabilidade, é uma solução mais ecológica, principalmente em aplicações de pavimentação de áreas de baixo tráfego, como calçadas e estacionamentos. Além disso,

diferentemente do concreto convencional, o concreto permeável não requer o uso de armaduras de aço, o que pode representar economia em outras etapas do projeto.

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações

Esta pesquisa se propôs a investigar os efeitos da adição de sílica ativa em diferentes proporções nas propriedades de concretos permeáveis destinados a pavimentos de tráfego leve. O estudo concentrou-se em dois aspectos fundamentais: a resistência à tração na flexão e a permeabilidade hidráulica. Para isso, foram elaboradas cinco misturas distintas, sendo duas de referência com relações água/cimento (*a/c*) de 0,30 e 0,40, e três misturas com substituição parcial do cimento por sílica ativa em teores de 5%, 15% e 20%. As amostras foram moldadas em blocos de 400 × 400 × 100 mm e posteriormente cortadas em prismas de 400 × 100 × 100 mm para os ensaios no estado endurecido. A análise comparativa entre os traços permitiu avaliar a influência da sílica ativa no desempenho mecânico e hidráulico dos concretos, fornecendo subsídios para o uso eficiente de materiais pozolânicos em soluções de infraestrutura sustentável.

O concreto permeável tem se consolidado como uma importante alternativa para o manejo de águas pluviais em áreas urbanas, contribuindo para a redução do escoamento superficial e recarga do lençol freático. Seu uso é especialmente indicado em pavimentos de tráfego leve, estacionamentos, calçadas e ciclovias, em função de sua elevada porosidade interconectada, que permite a rápida infiltração da água. No entanto, garantir um bom equilíbrio entre permeabilidade e resistência mecânica ainda é um desafio, o que motiva o desenvolvimento de estudos voltados à otimização de seus componentes e proporções.

A adição de sílica ativa às misturas cimentícias demonstrou influenciar significativamente tanto o comportamento no estado fresco quanto no estado endurecido do concreto. No estado fresco, devido à alta área superficial da sílica, observou-se uma tendência à redução da trabalhabilidade, o que foi contornado com o uso de aditivo superplastificante. No estado endurecido, a presença da sílica ativa pode promover reações pozolânicas benéficas, contribuindo para o preenchimento da matriz por produtos de hidratação secundários, resultando em microestrutura mais refinada e potencialmente maior resistência mecânica.

Quanto à permeabilidade, os resultados evidenciaram que apenas duas das cinco misturas (CPER30 e CPER40) superaram de forma expressiva o valor mínimo estabelecido pela NBR 16416 (2015), que é de $1,0 \times 10^{-3}$ m/s. O traço CPER30SA20, apesar de conter 20%

de sílica ativa, apresentou desempenho hidráulico próximo ao CPER30, sugerindo que, em determinadas proporções, a sílica pode não comprometer a conectividade dos poros. Por outro lado, os traços com 5% e 15% de sílica ativa (CPER30SA5 e CPER40SA15) apresentaram significativa redução da permeabilidade, indicando possível obstrução dos poros e redução da interconectividade devido ao preenchimento excessivo da matriz.

Em relação à resistência à tração na flexão, observou-se que três misturas (CPER30, CPER40 e CPER40SA15) atenderam à exigência mínima da NBR 16416 (2015), que é de 2 MPa para pavimentos de tráfego leve. A mistura CPER40SA15, com 15% de sílica ativa, apresentou desempenho muito próximo ao de CPER40, indicando que esse teor pode representar um ponto de equilíbrio entre resistência e permeabilidade. Por outro lado, as misturas CPER30SA5 e CPER30SA20 não atingiram o valor mínimo normativo, embora a CPER30SA20 tenha se destacado positivamente na análise hidráulica. Isso reforça a importância de avaliar os dois critérios de desempenho de forma conjunta na escolha da mistura mais adequada para aplicações práticas.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, observou-se que a adição de sílica ativa ao concreto permeável tem potencial para melhorar propriedades tanto no estado fresco quanto endurecido, além de contribuir para a redução dos impactos ambientais relacionados à produção de cimento. Apesar dos avanços proporcionados por este estudo, o tema ainda apresenta uma ampla gama de possibilidades a serem exploradas, especialmente no que se refere à aplicação prática, durabilidade e otimização das misturas. Assim, são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros que podem ampliar e aprofundar os conhecimentos nesta área:

- Investigar o comportamento mecânico e hidráulico de pavimentos executados com concreto permeável contendo sílica ativa sob tráfego leve real, considerando ciclos de chuva, variações de temperatura e ações mecânicas contínuas.
- Realizar testes com variações mais refinadas nos teores de sílica ativa e proporções de aditivo superplasticificante, buscando o equilíbrio ideal entre resistência, permeabilidade e viabilidade econômica.
- Explorar combinações de sílica ativa com outros materiais pozolânicos (como cinza volante, metacaulim ou escória de alto-forno) para verificar possíveis sinergias e otimizações de desempenho técnico e ambiental.

- Desenvolver uma análise completa do ciclo de vida dos diferentes traços com adição de sílica ativa, considerando desde a extração das matérias-primas até o descarte ou reciclagem, comparando seu impacto ambiental com o de concretos tradicionais.
- Estudar a resistência dos concretos com sílica ativa à carbonatação, ataque por íons cloreto, ciclos de congelamento e desgelo, e processos de lixiviação, com o objetivo de avaliar sua durabilidade frente a ambientes agressivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16416:2015** – Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. 2015.

ADIL, G.; KEVERN, J.T.; MANN, D. Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Volume 247, 30 June 2020, 118453. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118453>. Acesso em: 24 jun. 2024.

AGAR-OZBEK, A. S.; WEERHEIJM, J.; SCHLANGEN, E.; VAN BREUGEL, K. Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 41, p. 480–490, 2013.

ALIABDO, A.A.; ELMOATY, A.E.M.; FAWZY, A.M. Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**. Volume 193, nº 30, Pages 105-127, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.182>. Acesso em: 24 jun. 2024.

AMARAL, M.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. DE .. Atividade pozolânica da sílica ativa: análise em pastas cimentícias com diferentes teores de substituição. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 3, p. e13023, 2021.

AMUDHAVALLI, N. K.; MATHEW, J. Effect of Silica Fume on Strength and Durability Parameters of Concrete. **International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies**. v. 3, n. 1, p. 28-35. 2012.

ANWAR, F.H.; EL-HASSAN, H.; HAMOUDA, M.; DOBRADIÇA, G.; MO, K.H. Meta-Análise do Desempenho de Concretos Pervios com Substituições de Cimento e Agregados. **Edificações**. 2022; 12(4):461. <https://doi.org/10.3390/buildings12040461>.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. 2013, 113f. Dissertação (Mestre em engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: [Dissertacao Rafael Batezin.pdf \(usp.br\)](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/10130/13330/). Acesso em: 02 jun. 2024.

BIAL, H.; CHEN, T.; REN, M.; GAO, X.; SU, A. Influence of silica fume, metakaolin & SBR latex on strength and durability performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Volume 275, 15 March 2021, 122124. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122124>. Acesso em: 24 jun. 2024.

BIGOTTO, S.A.M. **Estudo de traços de concreto permeável com adição de areia e sílica**. 2021, 111 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, ilha Solteira, 2021. Disponível em: [content \(unesp.br\)](https://repositorio.unesp.br/handle/10803/290000). Acesso em: 02 jun. 2024.

BRASILEIRO, K.P.T.V. **Avaliação do uso de agregados reciclados e sílica ativa em concreto permeável**. 2023, 91f. Dissertação (Mestre em engenharia aplicada e sustentabilidade), Programa de Pós Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde, 2023. Disponível em: [2024-03-14-02-12-06Dissertacao 12-08-2023.pdf \(ifgoiano.edu.br\)](https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/10803/290000). Acesso em: 24 jun. 2024.

CARNEIRO, L.R.S., GARCIA, D.C.S., COSTA, M.C.F., *et al* “Evaluation of the pozzolanicity of nanostructured sol-gel silica and silica fume by electrical conductivity measurement,” **Construction and Building Materials**, v. 160, pp. 252–257, 2018.

CARDOSO, A.; DELMIRO, T.; MENDES, A.; MONTEIRO, E.; KOHLMAN RABBANI, E. Análise da Influência da Adição de Sílica Ativa como Substituição Parcial do Cimento em Argamassas Contra Ação de CO₂ e Íons Cloreto. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n. 3, 28 ago. 2017.

CHAITANYA, M.; RAMAKRISHNA, G. Enhancing the mechanical properties of pervious recycled aggregate concrete using silica fumes. **Material stoday Proceeding**, Volume 46, Part 1, 2021, Pages 634-637. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.549>. Acesso em: 24 jun. 2024.

COSTA, F. B. P., HASELBACH, L. M., FILHO, L. C. P. da S. Pervious concrete for desired porosity: Influence of w/c ratio and a rheology-modifying admixture. **Construction and Building Materials**, Volume 268, 121084, 2021.

FANG, M., WANG, X., LIU, J., XU, Z., & CHEN, Y. Design, application and performance improvement of Eco-Permeable pavement materials (Eco-PPMs): A review. **Construction and Building Materials**, v. 360, p. 129558, 2022.

FERNANDES, S. C.; BARRO, R. P.; FERREIRA, A. S.; BARROS, L. M. Produção de concreto de alta resistência com utilização de superplasticificante e adição de microssílica. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 12, 2020.

FERNANDEZ-GONZALVO, M., HERNANDEZ-CRESPO, C., MARTIN, M., & ANDRES DOMENECH, I. Comparison of permeable pavements effluent under Atlantic and Mediterranean rainfall regimes: A mid-term laboratory experience. **Building and Environment**, v. 206, p. 108332, 2021.

GORAN, A.; KEVERN, J.T.; MANN, D. Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Volume 247, 30 June 2020, 118453. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118453>. Acesso em: 24 jun. 2024.

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

GUIMARÃES, J. P. F. Sinergia entre nanosílica e sílica ativa na produção de concreto. 56º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON 2014. Rio Grande do Norte, 2014.

HASSAN, H.; ELKHOLY, S. Enhancing the performance of Alkali-Activated Slag-Fly ash blended concrete through hybrid steel fiber reinforcement. **Construction and Building Materials**, Volume 311, 13 December 2021, 125313. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125313>. Acesso em: 24 jun. 2024.

HASSAN, H.; HUSSEIN, A.; MEDLJY, J.; EL-MAADDAWY, T. Performance of Steel Fiber-Reinforced Alkali-Activated Slag-Fly Ash Blended Concrete Incorporating Recycled Concrete Aggregates and Dune Sand. **Buildings**. 2021; 11(8):327. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings11080327>. Acesso em: 24 jun. 2024.

HOLTZ, F. C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise de viabilidade técnica e do impacto ambiental.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

HU, N., ZHANG, J., XIA, S., HAN, R., DAI, Z., SHE, R., MENG, B. A field performance evaluation of the periodic maintenance for pervious concrete pavement. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121463, 2020.

HUANG, J.; LUO, Z.; KHAN, M.B.E. Impact of aggregate type and size and mineral admixtures on the properties of pervious concrete: An experimental investigation. **Construction and Building Materials**, Volume 265, 30 December, 2020, 120759. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120759>. Acesso em: 24 jun. 2024.

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

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada; Centro de Pesquisa em Ciência, Tecnologia e Sociedade. **Controle de Enchentes**. Publicado 03 de dezembro de 2020. Acesso em: 17 ago. 2024.

KIHARA, Y.; VISEDO, G.A indústria do cimento e o desenvolvimento do Brasil. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, 2014. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/a-industria-do-cimento-e-o-desenvolvimento-do-brasil>. Acesso em: 09 ago. 2024.

KIA, A., DELENS, J. M., WONG, H. S., CHEESEMAN, C. R. Structural and hydrological design of permeable concrete pavements. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00564, 2021.

KIA, A.; WONG, HONG, S.; CHEESEMAN, C. R. Clogging in permeable concrete: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 221-233, 2017.

KRAMAR, S.; DUCMAN, V. “Evaluation of ash pozzolanic activity by means of the strength activity index test, frattini test and DTA/TG analysis, **Tehnicki Vjesnik**, v. 25, n. 6, pp. 1746–1752, 2018.

LAMB, G. S. **Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

LANG, L.; DUAN, H.; CHEN, B. Properties of pervious concrete made from steel slag and magnesium phosphate cement. **Construction and Building Materials**, Volume 209, 10 June 2019, Pages 95-104. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.123>. Acesso em: 24 jun. 2024.

LIMA, G. T. DOS S.; R, J. C.; CHERIAF, M. Investigation of the properties of pervious concrete with a recycled aggregate designed with a new combination of admixture. **Construction and Building Materials**, Volume 340, 127710, 2022.

LOPES, A. N. M. **Avaliação comparativa de concretos com e sem sílica ativa para resistências entre 50 e 65 MPa.** 1999, 170p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Brasília.

LOU, Y.; KHAN, K.; AMIN, M. N.; AHMAD, W.; DEIFALLA, A. F.; AHMAD, A. Performance characteristics of cementitious composites modified with silica fume: A systematic review. **Case Studies in Construction Materials**, Volume 18, e01753, 2023.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. Ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

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

NIGRI, I.R. **Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos Gerais de Projeto** estabelecidos pela Norma ABNT NBR 16416: 2015. 2017, 45f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em engenharia civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: [monopoli10022817.pdf \(ufpj.br\)](https://monopoli10022817.pdf (ufpj.br)). Acesso em: 02 jun. 2024.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NGUYEN, D. H., BOUTOUIL, M., SEBAIBI, N., BARAUD, F., LELEYTER, L. Durability of pervious concrete using crushed seashells. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 137-150, 2017.

NAZEER, M.; KAPOOR, K.; SINGH, S. P. Strength, durability and microstructural investigations on pervious concrete made with fly ash and silica fume as supplementary cementitious materials. **Journal of Building Engineering**, volume 69, 106275, 2023.

OPISO, E.M.; SUPREMO, R.P.; PERODES, J.R. Effects of coal fly ash and fine sawdust on the performance of pervious concrete. **Heliyon**, n° 5, e02783, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02783>. Acesso em: 24 jun. 2024.

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

RAMANATHAN, S., MOON, H., CROLY, M., *et al* “Predicting the degree of reaction of supplementary cementitious materials in cementitious pastes using a pozzolanic test,” **Construction and Building Materials**, v. 204, pp. 621–630, 2019.

RÊGO, J.H.S., ROJAS, M.F., TERRADES, A.M., *et al* “Effect of partial substitution of highly reactive mineral additions by Nanosilica in cement pastes,” **Journal of Materials in Civil Engineerig**, v. 31, n. 1, pp. 1-11, 2019.

RAHMAN, K.; BARUA, S.; ANWAR, M. S.; HASAN, M. Z.; ISLAM, S. Removal of Heavy Metals from Stormwater Using Porous Concrete Pavement. **Journal of Modern Materials, /S. l.J.**, v. 7, n. 1, p. 37–44, 2020. DOI: 10.21467/jmm.7.1.37-44. Disponível em: <https://journals.aijr.org/index.php/jmm/article/view/2706>. Acesso em: 24 jun. 2024.

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

SANDOVAL, G.F.B.; GALOBARDES, I.; MOURA, A.C.; TORALLES, B.M. Hydraulic behavior variation of pervious concrete due to clogging. Case Studies in **Construction Materials**, Volume 13, December 2020, e00354. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00354>. Acesso em: 24 jun. 2024.

SATHIPARAN, N.; DASSANAYAKE, D.H.H.P; SUBRAMANIAM, D.N. Utilização de materiais cimentícios suplementares em concreto pérvio: uma revisão. **Int. J. Environ.** 21, 5883-5918, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05440-4>. Acesso em: 24 jun. 2024.

SCHETTINI, M. F. A. **Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto**. 2008, 126f. Dissertação (Mestre em engenharia civil), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/ISMS-7RTNGX>. Acesso em: 02 jun. 2024.

SEIDENSTUCKER M.S.; GOULART C.; TOMIM K.C.; JONER V. **Análise da contribuição da adição da sílica ativa na resistência à compressão de concretos**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC, Palmas/TO, 2019. Disponível em: ANALISE DA CONTRIBUIÇÃO DA ADIÇÃO DA SILICA ATIVA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS.pdf (confea.org.br). Acesso em: 26 jun. 2024.

SHAN, J., ZHANG, Y., WU, S., LIN, Z., LI, L., WU, Q. Pore characteristics of pervious concrete and their influence on permeability attributes. **Construction and Building Materials**, v. 327, p. 126874, 2022.

SINGH, A.; SAMPATH, P.V.; BILIGIRI, K.P. A review of sustainable pervious concrete systems: Emphasis on clogging, material characterization, and environmental aspects. **Construction and Building Materials**, Volume 261, 20 November 2020, 120491. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120491>. Acesso em: 24 jun. 2024.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Entrevistas, reuniões e textos validados com o SNIC, 2012.

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

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

VERZEGNASSI, Emerson. **Estudo das propriedades no estado fresco e endurecido do concreto leve autoadensável**. Limeira – SP, 2015. 121 p.

VIEIRA, G. L.; SCHIAVON, J. Z.; BORGES, P. M.; SILVA, S. R.; ANDRADE, J. J. O. Influence of recycled aggregate replacement and fly ash content in performance of pervious concrete mixtures. **Journal of Cleaner Production**, Volume 271, 122665, October 2020.

WANG, J., WANG, X., XU, W., XUE, C., LI, H., SUN, Z., & LI, J. Characteristics of thermal pollution from stormwater runoff from impermeable/permeable pavement surfaces via a lab-scale experiment. **Journal of Environmental Management**, v. 325, p. 116484, 2020.

WANG, X., WANG, Y., GE, X., TONG, B., SCHAEFER, V., WANG, K., LI, C. The quantitative assessment of clogging and cleaning effects on the permeability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 335, p. 127455, 2022.

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

ZAETANG, Y.; SAJA, V.; WONGSA, A.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycle concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, Volume 111, 15, 2016.

ZHANG, G., WANG, S., WANG, B., ZHAO, Y., KANG, M., WANG, P. Properties of pervious concrete with steel slag as aggregates and different mineral admixtures as binders. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119543, 2020.

ZHONG R.; LENG, Z.; POON, C.S. Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review. **Construction and Building Materials**, Volume 183, 20 September 2018, Pages 544-553. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.131>. Acesso em: 24 jun. 2024.

ZHU, B., CHU, L., YANG, F., & FWA, T. F. Improved approach for evaluating saturated surface infiltration capacity of interlocking-block permeable pavements. **Journal of Environmental Management**, v. 295, p. 113087, 2021.

ACI Committee 522. Report on pervious concrete. American Concrete Institute. 2010.

AHERN, J. Landscape and Urban Planning from Fail-Safe to Safe-to-Fail: Sustainability and Resilience in the New Urban World. **Landscape and Urban Planning** 100(4):341–43. 2011.

AHIABLAME, L. M., ENGEL, B. A., CHAUBEY, I. Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research. **Water, Air, and Soil Pollution** 223(7):4253–73. 2012.

ALAM, T., MAHMOUD, A., JONES, K.D., et al. A comparison of three types of permeable pavements for urban runoff mitigation in the semi-arid South Texas, U.S.A. **Water** 11, n. 10, p. 1992, 2019.

ARAÚJO, L. B. R.; BEZERRA, A. K. L.; SILVA, L. A.; CHAVES, A. C. B.; COSTA, H; N. da; BABADOPULOS, L. F. de A. L. Estudo das propriedades reológicas e microestruturais de ligante geopolimérico à base de cinza volante. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 23, n. 2, p. 181-194, abr./jun. 2023. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000200670>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT ISO 14040: gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto – requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16607: Cimento Portland – determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16917: Agregado graúdo – determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16972: agregados – determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17054: Agregados – determinação da composição granulométrica – método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17054: Agregados – determinação da composição granulométrica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14044: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014.

BRAGA, N. T. S.; ARRUDA JUNIOR, E. S.; CORDEIRO, L.N.P. Performance and runoff coefficient of permeable concretes subjected to heavy rainfall simulations. **Materia-Rio** de Janeiro, v. 27, p. 1, 2022.

BRAGA, N.T.S. **Concretos permeáveis na Amazônia: Desafios e Potencialidades Regionais**. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em arquitetura e urbanismo. Belém, 2019.

BRAGA, N.T.S., SOARES, H.S.B., CASTRO, C.M.S., CORDEIRO, L.N.P. 2020 Influência do grau de compacidade do esqueleto granular sobre o desempenho de concretos permeáveis. Anais do 62º Congresso Brasileiro do Concreto. Florianópolis, 2020.

BUTLER D., R. FARANI, G. FU, S. WARD, K. DIAO, M. ASTARAIE-IMANI. A new approach to urban water management: safe and sure. **Procedia Eng.** 89, 347-354. 2014.

CEMBUREAU. CEMBUREAU - The European Cement Association. [S. l.]: Cembureau, 2017.

CHANDRAPPA, A.K. E BILIGIRI, K. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 111, 262-274. 2016.

CHU, L., FWA, T.F., TAN, K.H. Laboratory Evaluation of Sound Absorption Characteristics of Pervious Concrete Pavement Materials. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. V. 2629, 1. 2017.

ĆOSIĆ, K., KORAT, L., DUCMAN, V., NETINGER, I. Influence of Aggregate Type and Size on Properties of Pervious Concrete. **Construction and Building Materials** 78:69–76. 2015.

DONG, X., GUO, H., ZENG, S. Enhancing Future Resilience in Urban Drainage System: Green versus Grey Infrastructure. **Water Research** 124:280–89. 2017.

DREELIN, E.A., FOWLER, L., RONALD CARROLL, C. A test of porous pavement effectiveness on clay soils during natural storm events, **Water Research** 40, n. 4, pp. 799–805, 2006.

HASELBACH, M. LIV; VALAVALA, SRINIVAS e MONTES, FELIPE. Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. **Journal of Environmental Management** 81-1, 42-49. 2006.

HEWLETT, P.C., LISKA, M. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. Capítulo “The Production of Low Energy Cements.” 5^a edição, 341-362. 2019.

HUANG, B. WU, H. SHU, X. BURDETTE E.G. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. **Construction and Building Materials** 24, 818-823. 2009.

HUANG, B., HUANG, H., CHEN, J. Effects of mineral additives on the mechanical and permeability properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials** 74, 1-7. 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), Tecnology Roadmap: low-carbon transistion in cement industry. France, Disponível em: <https://www.wbcsd.org/contentwbc/download/4586/61682/1>, 2018.

JIANZHUANG, X., XIANMING, S., CHUNYAN, Z., YANPENG, W. Effect of mineral admixtures and fibers on mechanical properties of permeable concrete, **Construction and Building Materials** 121, 290-299. 2016.

KUMAR, K., KOZAK, J., HUNDAL, L., COX, A., ZHANG, H., GRANATO, T. In-Situ infiltration Performance of Different Permeable Pavements in a Employee Used Parking Lot - A Four-Year Study. **Journal of Environmental Management** 167:8–14. 2016.

KWIATKOWSKI, M., WELKER, A., TRAVER, R., et al. Evaluation of an infiltration best management practice utilizing pervious concrete. **Journal of the American Water Resources Association** 43-5, 1208–1222. 2007.

- LI, J., LI, L., FU, X., GAO, X., ZHU, J. Performance evaluation of permeable concrete under freeze-thaw cycles and traffic loads. **Advances in Civil Engineering** 1-13. 2019.
- LI, L., LI, J., LI, M., WANG, L. Influence of supplementary cementitious materials on the performance of permeable concrete. **Journal of Building Materials** 23(2), 346-355. 2020.
- LONG, C., LI, H., YU, X., HUANG, B. Performance evaluation of permeable concrete and its potential in mitigating urban heat island and stormwater runoff. **Journal of Cleaner Production** 239, 118058. 2019.
- MONTES, F., VALAVALA, S., HASELBACH, L. Um novo método de teste para medições de porosidade de concreto permeável de cimento portland. **Jornal da ASTM International** 2 (1). 2005.
- NADER, G., SHIVAJI, D. Desenvolvimento de aplicações de pavimentos de concreto sem finos, **J. Transp. Eng.**, maio/junho, 283 – 288. 1995.
- NEPTUNE, A. I., PUTMAN, B.J. Effect of Aggregate Size and Gradation on Pervious Concrete Mixtures. **ACI Material Journal** 107-M71. 2010.
- NILI, M., AFROUGHSABET, V. Durability of pervious concrete pavement-a review. **International Journal of Pavement Engineering** 18(2), 172-180. 2017.
- NING, X., MICHELLE, A. e XIAUMING, S. Permeable, concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. **Journal of Cleaner Production** 210, 1605-1621. 2019.
- ORSINI, F., MARRONE, P. Approaches for a low-carbon production of building materials: A review. **Journal of Cleaner Production** 241. 2019.
- ORSINI, F., MARRONE, P. Approaches for a low-carbon production of building materials: A review. **Journal of Cleaner Production** 241. 2019.
- PENG, Z., JINYAN, K., WENBIN, P., XIN, Z., YUANBIN, C. Effects of Low-Impact Development on Urban Rainfall Runoff under Different Rainfall Characteristics. **Polish Journal of Environmental Studies** 28(2):771–83. 2019.
- REIS, D.C., QUATTRONE, M., SOUZA, J.F.T., PUNHAGUI, K.R.G., PACCA, S.A., JOHN, V.M. Potential CO₂ reduction and uptake due to industrialization and efficient cement use in Brazil by 2050. **Journal of Industrial Ecology** 25, 344-358. 2021.
- RODRIGUES, P.C.; BRAGA, N.T.S.; ARRUDA JUNIOR, E.S.; CORDEIRO, L.N.P.; MELO, G.S.V. Effect of pore characteristics on the sound absorption of pervious concretes. **Case Studies In Construction Materials** 17, e01302, 2022.
- RUSHTON, B. Low-impact parking lot design reduces runoff and pollutant loads, **Journal of Water Resources Planning and Management** 172, 3, 172–179, 2001.
- SANTOS, R. C.; TAVARES, L. M.; ARAÚJO, E. B. Use of Supplementary Cementitious Materials in the Production of Pervious Concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais** 7, 4, 657-673, 2014.

SCRIVENER, K. L., JOHN, V. M., GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research** 114, 2–26. 2018.

SIMÕES, O. G.; ZANOTELLI, J.; PILAR, R.; SCHANKOSKI, R. Avaliação das propriedades mecânicas e de permeabilidade de peças de concreto permeável contendo resíduos de rocha ornamental. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 23, n. 4, p. 241-254, out./dez. 2023. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000400701>

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro, SNIC, 2019.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento Da Drenagem Urbana. **Revista Brasileita de Recursos Hídricos** 7(1):5–27. 2002.

XIE, N., AKIN, M., SHI, X. Permeable Concrete Pavements: A Review of Environmental Benefits and Durability. **Journal of Cleaner Production** 210:1605–21. 2019.

YAHIA, A., KABAGIRE, K.D., New approach to proportion pervious concrete, **Construction and Building Materials** 62, pp. 38–46, 2014.

YANG, J. e GIANG, GL. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research** 33 (3), 381-386. 2003.

YINGHONG, Q. A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 52, 445-459. 2015.

ZAMPIERI, V.A. **Cimento Portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: fabricação, hidratação e desempenho mecânico**. Tese (doutorado em geociências), instituto de geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

ZHANG, M., LIU, J., LI, C., ZHANG, L. Effects of mineral admixtures on the compressive strength of pervious concrete: A review. **Construction and Building Materials**, 221, 261-271. 2019.

ZHONG, R., LENG, Z., POON, C. Research and Application of Pervious Concrete as a Sustainable Pavement Material: A State-of-the-Art and State-of-the-Practice Review. **Construction and Building Materials** 183:544–53. 2018.

ZHONG, R., WILLE, K. Compression Response of Normal and High Strength Pervious Concrete. **Construction and Building Materials** 109:177–87. 2016.

ZHONG, R., WILLE, K. Material Design and Characterization of High Performance Pervious Concrete. **Construction and Building Materials** 98:51–60. 2015.