



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E

AMBIENTAL

– DOUTORADO –

**CONCRETO PERMEÁVEL CONTENDO RESÍDUOS DE CAULIM E
METACAILIM: PROPRIEDADES FÍSICAS, HIDRÁULICAS,
MECÂNICAS E ADSORTIVAS**

Por

Diego de Paiva Bezerra

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Doutor*

João Pessoa – Paraíba

Junho de 2026



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E

AMBIENTAL

– DOUTORADO –

**CONCRETO PERMEÁVEL CONTENDO RESÍDUOS DE CAULIM E
METACAILIM: PROPRIEDADES FÍSICAS, HIDRÁULICAS,
MECÂNICAS E ADSORTIVAS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor.

Diego de Paiva Bezerra

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Aline Figueirêdo da Nóbrega

Coorientadora: Dr.^a Raphaele de Lira Meireles de Castro Malheiro

João Pessoa – Paraíba

Junho de 2026

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

B574c Bezerra, Diego de Paiva.

Concreto permeável contendo resíduos de caulim e metacaulim : propriedades físicas, hidráulicas, mecânicas e adsorptivas / Diego de Paiva Bezerra. - João Pessoa, 2026.
184 f. : il.

Orientação: Aline Figueirêdo da Nóbrega.

Coorientação: Raphaelle de Lira Meireles de Castro Malheiro.

Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Drenagem urbana sustentável. 2. Multifuncionalidade. 3. Adsorção de Metais. 4. Micro-CT. 5. Concreto permeável. 6. Resíduo de caulim. 7. Materiais cimentícios. 8. Permeabilidade. I. Nóbrega, Aline Figueirêdo da. II. Malheiro, Raphaelle de Lira Meireles de Castro. III. Título.

**CONCRETO PERMEÁVEL CONTENDO RESÍDUOS DE CAULIM E METACAULIM:
PROPRIEDADES FÍSICAS, HIDRÁULICAS, MECÂNICAS E ADSORTIVAS**

DIEGO DE PAIVA BEZERRA

Tese aprovada em 26 de junho de 2026 - Período Letivo: 2026.1



Documento assinado digitalmente
ALINE FIGUEIREDO DA NOBREGA
Data: 13/07/2026 10:29:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Aline Figueiredo da Nobrega – UFCG
Orientador(a)

Assinado por: **Raphaelle de Lira Meireles de Castro**
Malheiro
Num. de Identificação: 31035610
Data: 2026.07.07 11:05:08+01'00'

Prof(a). Dr(a). Raphaelle de Lira Meireles de Castro Malheiro – UMINHO
Coorientadora



Documento assinado digitalmente
NORMANDO PERAZZO BARBOSA
Data: 11/07/2026 19:06:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Normando Perazzo Barbosa – UFPB
Examinador(a) Interno(a)



Documento assinado digitalmente
LEONARDO MEDEIROS DA COSTA
Data: 07/07/2026 16:29:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Leonardo Medeiros da Costa – UFPB
Examinador(a) Interno(a)



Documento assinado digitalmente
GERSSON FERNANDO BARRETO SANDOVAL
Data: 13/07/2026 22:21:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Gersson Fernando Barreto Sandoval – UPTC
Examinador(a) Externo(a)

Assinado por: **AIRES FERNANDO FERNANDES**
LEITE CAMÕES DE AZEVEDO
Num. de Identificação: 07345364
Data: 2026.07.06 12:15:13+01'00'

Prof(a). Dr(a). Prof(a). Dr(a). Aires Fernando F. L. C. de Azevedo – UMINHO
Examinador(a) Externo(a)



Documento assinado digitalmente
GUILHERME DOS SANTOS TELES
Data: 07/07/2026 19:01:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Prof(a). Dr(a). Guilherme dos Santos Teles – UFCG
Examinador(a) Externo(a)

João Pessoa/PB
2026

Dedico esta Tese de Doutorado à minha mãe, Judite, e ao meu pai, Marizo, que, desde a minha infância, fizeram da educação o maior legado que poderiam me deixar, abdicando de tudo para que eu pudesse chegar até aqui.

Dedico-a, igualmente, à minha irmã, Maysa, cujo incentivo constante e confiança foram fundamentais ao longo de toda essa trajetória.

AGRADECIMENTOS

O conhecimento é a maior herança que podemos receber, pois é algo único e que ninguém pode tirar de nós. Sua construção exige perseverança, disciplina e resiliência, qualidades muitas vezes individuais. No entanto, chegar até aqui foi muito mais do que um esforço pessoal. Ao longo dessa trajetória encontrei pessoas que acreditaram em mim, me incentivaram e me ajudaram a seguir em frente nos momentos mais difíceis. Também encontrei na fé a força necessária para continuar confiando que Deus sempre conduzia meus passos e preparava os caminhos quando tudo parecia incerto. Cada experiência vivida, cada desafio superado e cada pessoa que cruzou meu caminho contribuíram para o meu amadurecimento como pessoa, profissional e pesquisador. Por isso, este momento não é apenas meu. Assim, de forma especial, agradeço:

A Deus e à Virgem Maria Santíssima, por sempre me protegerem e guiarem nesta trajetória. Nos momentos mais difíceis e também nas maiores alegrias, foi a Eles que recorri em busca de amparo e gratidão.

Aos meus pais, Marizo Bezerra e Judite Paiva, por serem meu alicerce e minha inspiração. Obrigado por acreditarem em minha capacidade, por todos os ensinamentos transmitidos e por nunca medirem esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Se hoje concluo este doutorado, é porque vocês estiveram ao meu lado em cada etapa da caminhada. Sou eternamente grato por terem me educado e formado o homem que sou hoje.

À minha irmã, Maysa Paiva, por ser apoio nos momentos difíceis, tornando a caminhada mais leve e sempre me encorajando, mostrando sempre que era possível.

Aos familiares, amigos, alunos e colegas que depositaram confiança em mim e contribuíram, de diferentes formas, para esta conquista.

À minha orientadora, Aline Nóbrega, e à minha coorientadora, Raphaele Malheiro, pela disponibilidade, dedicação e orientação durante o desenvolvimento desta pesquisa. Mais do que isso, por demonstrarem, através do exemplo, a importância da ética, da responsabilidade e do compromisso com a ciência, servindo de inspiração para minha formação como pesquisador e profissional.

Aos membros do GEM (Grupo de Pesquisa Estruturas e Materiais), por compartilharem comigo os desafios, aprendizados e conquistas desta jornada. Os momentos vividos no laboratório, as reuniões, as discussões e as confraternizações ficarão para sempre guardados em minha memória.

O desenvolvimento desta pesquisa somente foi possível graças à colaboração de diversos profissionais, pesquisadores, técnicos e instituições. Por isso, agradeço especialmente:

Aos funcionários do Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME) da Universidade Federal da Paraíba, em especial a Sebastião e Delby, pelo auxílio na realização dos ensaios laboratoriais.

Ao Laboratório de Materiais do Centro Universitário de João Pessoa (UNIPÊ), em especial ao técnico Ricardo, pela colaboração e assistência nos procedimentos experimentais.

Ao grupo de pesquisa *3DCP Concrete Printing* do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, pelo suporte nos testes experimentais realizados.

Ao Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais (LT2M) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte.

Ao Núcleo de Estudos e Pesquisa em Materiais (NEPEM–UFPB).

À Indústria de Mineração Kaoling, pelo fornecimento dos insumos utilizados nesta pesquisa.

Ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho e ao Centro de Tecnologia Mecânica e Automação da Universidade de Aveiro, pela oportunidade de desenvolver parte desta pesquisa durante o período de atividades realizado no exterior, experiência que contribuiu significativamente para minha formação acadêmica e pessoal.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão da bolsa de Doutorado e da bolsa de Doutorado Sanduíche, fundamentais para a realização desta pesquisa.

A todos que, mesmo não mencionados nominalmente, contribuíram direta ou indiretamente para que este momento se tornasse realidade.

Talvez eu não tenha sido o melhor, mas fui o melhor que pude ser em cada etapa desta caminhada. E isso, para mim, já é motivo de gratidão.

Muito obrigado!

RESUMO

A intensificação da impermeabilização do solo urbano tem agravado problemas relacionados à drenagem e à qualidade das águas pluviais, demandando técnicas construtivas capazes de desempenhar, de forma integrada, funções hidráulicas, estruturais e ambientais. Nesse contexto, destaca-se o conceito de desempenho multifuncional dos concretos permeáveis, associado à capacidade de conciliar permeabilidade hidráulica, resistência mecânica e capacidade adsortiva em um único material. Nessa perspectiva, os resíduos de caulim, tanto na fração fina (RCF) quanto na grossa (RCG), apresentam potencial de aplicação nas misturas de concretos permeáveis, uma vez que materiais à base de caulim são reconhecidos por sua capacidade adsortiva. Além disso, estima-se que, a cada tonelada de caulim beneficiado, cerca de 80% se torna resíduo. Esse cenário representa um relevante passivo ambiental, devido à ocupação de grandes áreas e à degradação ambiental associada à atividade mineradora, provocando impactos no solo e nos corpos hídricos adjacentes. Diante desse contexto, este estudo avaliou o desempenho multifuncional de concretos permeáveis contendo metacaulim, RCF e RCG, por meio de uma abordagem experimental integrada, incluindo análise mecânica, hidráulica e de adsorção de íons metálicos (Al^{3+} e Fe^{2+}) presentes em águas pluviais contaminadas simuladas em laboratório. Inicialmente, realizou-se a caracterização química, mineralógica, física e morfológica dos materiais. Em seguida, o estudo foi desenvolvido a partir da análise preliminar das pastas cimentícias, que continham substituições e adições de metacaulim (10% e 20%) em relação à massa de cimento. As pastas com melhor desempenho mecânico foram posteriormente estudadas em misturas de concretos permeáveis de referência, compostas por agregado natural e substituições de 10 e 20% de metacaulim em relação à massa de cimento. Na sequência, foram analisadas misturas de concretos com substituição de 10% de metacaulim em relação à massa de cimento e adição do RCF e do RCG em teores de 10, 20, 30 e 40% em relação à massa de agregado natural (brita). Os concretos permeáveis foram avaliados nos estados fresco e endurecido. A caracterização física incluiu ensaios de índice de vazios, análise bidimensional por imagens obtidas por programação Python, análise tridimensional por microtomografia computadorizada de raios X (micro-CT), análise de textura e permeabilidade. As propriedades mecânicas foram determinadas pelos ensaios de resistência à compressão, à tração na flexão e à perda de massa por abrasão. Adicionalmente, avaliou-se a durabilidade frente à carbonatação. Para integrar as diferentes propriedades investigadas, empregou-se uma análise multicritério baseada em normalização adimensional, permitindo identificar as misturas RCF10 e RCG10 como aquelas com melhor desempenho global, conciliando permeabilidade, resistência mecânica e capacidade adsortiva. Os resultados demonstram que adições de 10% de RCF e RCG promoveram refinamento moderado da matriz pasta/agregado, aumento das resistências mecânicas e manutenção da permeabilidade em níveis adequados para pavimentos submetidos a cargas leves. Diferentemente disso, teores mais elevados RCG (30% e 40%) resultaram em misturas com maior heterogeneidade interna, interfaces menos coesas e maior perda de massa por abrasão. As misturas com resíduo apresentaram desempenho adsortivo expressivo nas primeiras horas de ensaio (*First Flush*), com remoções de Al^{3+} e Fe^{2+} variando entre 25% e 48%. Portanto, diante dos resultados obtidos foi possível destacar que teores de 10% de RCF e RCG pode ser considerado o mais viável do ponto de vista técnico para uso em concreto permeável. Dessa forma, a utilização desses resíduos pode contribuir para a economia circular, configurando uma solução tecnicamente viável e sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: Drenagem urbana sustentável, Multifuncionalidade, Adsorção de Metais, Micro-CT.

ABSTRACT

The intensification of urban soil impermeabilization has aggravated problems related to drainage and stormwater quality, requiring construction techniques capable of simultaneously performing hydraulic, structural, and environmental functions. In this context, the concept of multifunctional performance of pervious concrete stands out, being associated with the ability to combine hydraulic permeability, mechanical strength, and adsorptive capacity within a single material. From this perspective, kaolin residues, both in the fine fraction (FKR) and coarse fraction (CKR), present potential for application in pervious concrete mixtures, since kaolin-based materials are recognized for their adsorptive capacity. In addition, it is estimated that, for every ton of processed kaolin, approximately 80% becomes waste. This scenario represents a significant environmental liability due to the occupation of large disposal areas and the environmental degradation associated with mining activities, causing impacts on soils and adjacent water bodies. Given this context, this study evaluated the multifunctional performance of pervious concretes containing metakaolin, FKR, and CKR through an integrated experimental approach, including mechanical, hydraulic, and adsorption analyses of metallic ions (Al^{3+} and Fe^{2+}) present in simulated contaminated stormwater. Initially, the chemical, mineralogical, physical, and morphological characterization of the materials was performed. Subsequently, the study was developed based on a preliminary analysis of cement pastes containing metakaolin replacements and additions (10% and 20%) relative to cement mass. The cement pastes with the best mechanical performance were later investigated in reference pervious concrete mixtures composed of natural aggregate and 10% and 20% metakaolin replacements relative to cement mass. Thereafter, concrete mixtures containing 10% metakaolin replacement relative to cement mass and additions of FKR and CKR at contents of 10%, 20%, 30%, and 40% relative to natural aggregate mass were analyzed. The pervious concretes were evaluated in both fresh and hardened states. Physical characterization included void ratio tests, two-dimensional image analysis obtained through Python programming, three-dimensional analysis using X-ray micro-computed tomography (micro-CT), texture analysis, and permeability tests. Mechanical properties were determined through compressive strength, flexural tensile strength, and abrasion mass loss tests. Additionally, durability against carbonation was evaluated. To integrate the different investigated properties, a multicriteria analysis based on dimensionless normalization was employed, allowing the identification of mixtures FKR10 and CKR10 as those presenting the best overall performance by balancing permeability, mechanical strength, and adsorptive capacity. The results demonstrated that additions of 10% FKR and CKR promoted moderate refinement of the paste–aggregate matrix, increased mechanical strength, and maintained permeability at adequate levels for pavements subjected to light traffic loads. In contrast, higher CKR contents (30% and 40%) resulted in mixtures with greater internal heterogeneity, less cohesive interfaces, and higher abrasion mass loss. The mixtures containing residues exhibited significant adsorptive performance during the initial hours of testing (First Flush), with Al^{3+} and Fe^{2+} removal efficiencies ranging from 25% to 48%. Therefore, based on the obtained results, it was possible to highlight that 10% contents of FKR and CKR may be considered the most technically viable for application in pervious concrete. Thus, the use of these residues may contribute to the circular economy, constituting a technically feasible and sustainable solution.

KEYWORDS: Sustainable urban drainage, Multifunctionality, Metal adsorption, Micro-CT.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	17
1.1 JUSTIFICATIVA	20
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 <i>Objetivo geral</i>	21
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	21
1.3 HIPÓTESES	21
1.4 INOVAÇÃO E ORIGINALIDADE DA TESE	22
1.5 ESTRUTURA DA TESE.....	22
CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO.....	24
2.1 CONCRETO PERMEÁVEL: FUNDAMENTOS E CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	24
2.1.1 <i>Conceitos, definições e características gerais</i>	24
2.1.2 <i>Proporções de dosagem</i>	24
2.1.3 <i>Influência da granulometria e geometria dos agregados</i>	25
2.1.4 <i>Estrutura de vazios, permeabilidade e propriedades mecânicas</i>	26
2.2 PANORAMA ATUAL DOS ESTUDOS SOBRE CONCRETO PERMEÁVEL SUSTENTÁVEL	31
2.2.1 <i>Uso de fibras em concretos permeáveis</i>	32
2.2.2 <i>Utilização de materiais cimentícios suplementares e adições minerais</i>	32
2.2.3 <i>Incorporação de resíduos industriais e resíduos da construção civil</i>	34
2.2.4 <i>Desempenho hidráulico e aplicações em drenagem urbana</i>	35
2.3 MÉTODOS DE VERIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS	36
2.4 A MULTIFUNCIONALIDADE DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS: UMA NOVA ABORDAGEM	39
2.5 O RESÍDUO DE CAULIM NAS FRAÇÕES FINAS E GROSSAS	41
2.5.1 <i>O caulim: principais características, reservas e obtenção do minério</i>	41
2.5.2 <i>A reutilização dos resíduos de caulim em misturas cimentícias</i>	47
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1 DELINEAMENTO GERAL DA PESQUISA	49
3.2 MATERIAIS	50
3.2.1 <i>Caracterização dos materiais</i>	53
3.3 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS DE PASTAS CIMENTÍCIAS E CONCRETOS PERMEÁVEIS	62
3.4 MÉTODOS DE ENSAIO APLICADOS ÀS PASTAS CIMENTÍCIAS E AOS CONCRETOS PERMEÁVEIS	66
3.4.1 <i>Métodos e ensaios aplicados às pastas cimentícias</i>	66
3.4.1.1 <i>Estado fresco das pastas cimentícias: procedimento de mistura, trabalhabilidade e moldagem</i>	66
3.4.1.2 <i>Estado endurecido das pastas cimentícias: resistência à tração na flexão e à compressão</i>	67
3.4.2 <i>Métodos de ensaios aplicados aos concretos permeáveis</i>	69
3.4.2.1 <i>Procedimento de mistura, trabalhabilidade, moldagem e extração dos corpos de prova dos concretos permeáveis</i>	70

3.4.2.2 Estado endurecido dos concretos permeáveis: propriedades físicas, hidráulicas, mecânicas, adsorptivas e durabilidade.....	73
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
4.2 PASTAS CIMENTÍCIAS ESTUDADAS	83
4.2.1 <i>Estado fresco das pastas cimentícias: trabalhabilidade</i>	<i>83</i>
4.2.2 <i>Estado endurecido das pastas cimentícias: resistência mecânica à flexão e à compressão</i>	<i>86</i>
4.3 PROPRIEDADES NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO DAS MISTURAS REFERÊNCIAS DE CONCRETOS PERMEÁVEIS.....	90
4.4 AVALIAÇÃO DAS MISTURAS DE CONCRETOS PERMEÁVEIS CONTENDO RCF E RCG	102
4.4.1 <i>Trabalhabilidade</i>	<i>102</i>
4.4.2 <i>Absorção por capilaridade.....</i>	<i>105</i>
4.4.4 <i>Índice de vazios</i>	<i>107</i>
4.4.5 <i>Permeabilidade.....</i>	<i>111</i>
4.4.6 <i>Resistência à compressão, à tração na flexão e perda de massa por abrasão</i>	<i>116</i>
4.4.7 <i>Análise adsorptiva em relação aos íons de alumínio e ferro</i>	<i>122</i>
4.4.8 <i>Durabilidade frente à carbonatação</i>	<i>137</i>
4.4.9 <i>Análise multifuncional.....</i>	<i>140</i>
4.4.10 <i>Valorização dos resíduos de caulim.....</i>	<i>145</i>
4.4.11 <i>Redução das emissões de CO₂.....</i>	<i>146</i>
CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	149
5.1 CONCLUSÕES	149
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	150

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema da funcionalidade do concreto permeável em sistemas de drenagem urbana sustentável.....	40
Figura 2.2 – a) Imagem microscópica da caulinita (Konan <i>et al.</i> 2009); b) Imagem microscópica do caulim natural, não submetido a processos de beneficiamento.....	42
Figura 2.3 – Processo de beneficiamento do caulim por via úmida.....	45
Figura 2.4 – Depósitos de resíduo de caulim no município de Juazeirinho – PB	46
Figura 3.1 – Fluxograma geral das etapas metodológicas da pesquisa	49
Figura 3.2 – Locais de obtenção dos materiais: (a) mapa do Brasil; (b) localização dos lugares de onde vem o agregado para uso em concretos e argamassas no interior da Paraíba; (c) matéria-prima da argila caulinita; (d) locais onde é obtido o agregado usado na região litorânea do estado da Paraíba	52
Figura 3.3 – Difrátogramas de raios X (DRX): (a) CP V ARI; (b) metacaulim e (c) resíduo de caulim	55
Figura 3.4 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do grão de resíduo de caulim: (a) ampliação de 3000 X e (b) ampliação de 4000 X.....	57
Figura 3.5 – Curvas da Granulometria por Difração de Raios Laser do CP V ARI e MK	58
Figura 3.6 – (a) ensaio de índice de forma, ME 425 (DNIT, 2020); (b) ensaio de abrasão à Los Angeles, ME 451 (DNIT, 2024).....	59
Figura 3.7 – Caracterização física dos materiais grossos: (a) curvas granulométricas do RC, do agregado litoral e do agregado sertão com os limites utilizados segundo a NBR 7211 (ABNT, 2022); (b) frações retidas nas diferentes malhas	60
Figura 3.8 – Esquema experimental e composições estudadas das pastas e dos concretos permeáveis.....	64
Figura 3.9 – Equipamentos utilizados para: 1 – mistura; 2 - análise da trabalhabilidade e 3 - moldagem das pastas	67
Figura 3.10 – Método de ensaios: 1 e 2 - resistência à tração na flexão e 3 – resistência à compressão (área comprimida).....	68
Figura 3.11 – Procedimento de mistura, avaliação da trabalhabilidade, moldagem e extração dos corpos de prova das misturas de concreto permeável estudadas	72
Figura 3.12 – Procedimento para obtenção de amostra para análise qualitativa dos poros dos concretos permeáveis estudados.....	73
Figura 3.13 – Procedimento de análise de absorção por capilaridade dos concretos permeáveis estudados	74
Figura 3.14 – Procedimento ilustrativo do ensaio para obtenção do coeficiente de permeabilidade em amostras secas e saturadas: (a) carga constante; (b) carga variável..	75
Figura 3.15– Procedimento dos ensaios de resistência mecânica: (a) resistência à compressão; (b) resistência à tração na flexão e (c) perda de massa por abrasão	76
Figura 3.16 – Procedimento do método utilizado para adsorção de íons de alumínio e ferro .	79
Figura 3.17 – Procedimento do método utilizado para verificar a durabilidade das misturas de concretos permeáveis estudadas frente à carbonatação	81
Figura 3.18 – Fluxograma das etapas metodológicas da análise estatística	82
Figura 4.1 – Trabalhabilidade das pastas cimentícias (PREF, SMK10, SMK20, AMK10 e AMK20).....	83
Figura 4.2 – Resistência à compressão e à flexão aos 7, 28 e 63 dias de cura das pastas estudadas (PREF, SMK10, SMK20, AMK10 e AMK20).....	86
Figura 4.3 – Trabalhabilidade das misturas de concretos permeáveis de referência e seus limites segundo 522R-06 (ACI, 2010) e NBR 16416 (ABNT, 2015).....	91

Figura 4.4 – Absorção de água por capilaridade nas misturas de concretos permeáveis de referências (análise final no 7º dia de ensaio)	92
Figura 4.5 – Desenvolvimento no tempo da absorção de água por capilaridade das misturas de concretos permeáveis de referência em diferentes idades de cura: (a) 28 dias e (b) 63 dias	93
Figura 4.6 – Imagens 2D dos cortes transversais das misturas dos concretos permeáveis: referências (REF, REFMK10, REFMK20)	94
Figura 4.7 – Índice de vazios das misturas dos concretos permeáveis, referências (REF, REFMK10 e REFMK20) por meio experimental	95
Figura 4.8 – Coeficiente de permeabilidade das misturas de concretos permeáveis de referência nos estados saturado seco e saturado: (a) ensaio à carga constante e (b) ensaio à carga variável.....	96
Figura 4.9 – Resultados das misturas de referência quanto a: (a) correlação entre porosidade e resistência à compressão; (b) correlação entre porosidade e resistência à tração na flexão; (c) correlação entre porosidade e perda de massa por abrasão.....	98
Figura 4.10 – Trabalhabilidade das misturas dos concretos permeáveis de referência, com RCF e RCG e seus limites conforme a norma 522R-06 (ACI, 2010) e a NBR 16416 (ABNT, 2015).....	103
Figura 4.11 – Absorção de água por capilaridade nas misturas de concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise final no 7º dia de ensaio).....	105
Figura 4.12 – Absorção por capilaridade para diferentes tempos de ensaio das misturas de concretos permeáveis contendo RCF e RCG em diferentes idades de ensaio: (a) 28 dias e (b) 63 dias	106
Figura 4.13 – Imagens 2D dos cortes transversais das misturas de concretos permeáveis: (a) imagens das misturas de concreto permeável analisadas; (b) imagem ampliada com representação das áreas com maior densidade, refinamento dos poros e macroporos ...	108
Figura 4.14 – Índice de vazios (porosidade) das amostras de concreto permeável com RCF e RCG obtidas por meio experimental	110
Figura 4.15 – Coeficiente de permeabilidade à carga constante para misturas de concretos permeáveis com RCF e RCG para amostras saturadas e não saturadas	112
Figura 4.16 – Coeficiente de permeabilidade à carga variável para misturas de concretos permeáveis com RCF e RCG para amostras saturadas e não saturadas	114
Figura 4.17 – Correlação entre porosidade e resistência à compressão das misturas de concreto permeável contendo RCF e RCG.....	117
Figura 4.18 – Correlação entre porosidade e resistência à tração na flexão das misturas de concreto permeável contendo RCF e RCG.....	119
Figura 4.19 – Correlação entre porosidade e resistência à tração na flexão das misturas de concreto permeável contendo RCF e RCG.....	120
Figura 4.20 – Desgaste por abrasão das misturas: REFMK10, RCF10-40 e GKR10-40.....	122
Figura 4.21 – Micrografias das superfícies dos concretos permeáveis: REFMK10, RCF10-40 e GKR10-40.....	123
Figura 4.22 – Seções ortogonais obtidas por micro-CT da mistura RCG40, reconstruídas no software DataViewer (Bruker micro-CT), evidenciando a distribuição das fases: branco – resíduo de caulim; cinza-escuro – agregado graúdo natural; cinza intermediário – fase cimentícia. Condições de varredura: 100 kV, 100 μ A, filtro de Cu de 1 mm e tamanho de voxel de 25 μ m	125
Figura 4.23 – (a) Reconstrução tridimensional da mistura RCG40 gerada no software CTVox (Bruker micro-CT), ilustrando a configuração microestrutural global e a dispersão das partículas. (b) Seções internas extraídas do volume tridimensional no CTVox,	

evidenciando as zonas de transição interfacial e a distribuição dos poros e das fases sólidas no interior do material	126
Figura 4.24 – Exemplo de binarização de imagens no software CTAn (Bruker micro-CT). A imagem original em escala de cinza (mistura RCG40) (a) e a imagem binarizada correspondente (b) ilustram a separação, baseada em limiar, entre a matriz sólida (branco) e o espaço poroso (preto), utilizada como base para a quantificação da porosidade.....	127
Figura 4.25 – Curva de distribuição do tamanho de poros obtida no software CTAn, apresentando a porcentagem do volume total de poros em função do diâmetro equivalente dos poros (mm)	129
Figura 4.26 – Análise da adsorção em amostras com resíduo de caulim: a) percentual de redução em relação ao tempo e b) concentração de íons de alumínio e ferro e variação do pH em relação ao tempo	130
Figura 4.27 – Adsorção de íons de alumínio: a) Porcentagem de redução de íons de Al em relação ao tempo; b) Concentrações e pH em relação ao tempo	132
Figura 4.28 – Adsorção de íons de ferro: a) Porcentagem de redução de íons de Fe em relação ao tempo; b) Concentrações e pH em relação ao tempo.....	135
Figura 4.29 – Evolução da carbonatação nas misturas de concreto permeável contendo RCF e RCG	138
Figura 4.30 – Análise multifuncional das misturas: (a) Heatmap de eficiência relativa das propriedades normalizadas; (b) Gráfico radar do índice acumulado de desempenho....	141
Figura 4.31 – Resumo gráfico da pesquisa considerando as principais fases: 1 – Firt Flush em contato direto com o pavimento permeável; 2 – Valorização dos resíduos de caulim e economia circular; 3 – Análise multifuncional do concreto permeável	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características de concretos permeáveis para diferentes pesquisas	28
Tabela 2.2 – <i>Ranking</i> mundial dos principais detentores das reservas de caulim, no ano de 2021	43
Tabela 2.3 – Reservas de caulim nos estados do Brasil	44
Tabela 3.1 – Materiais utilizados nas misturas e suas respectivas descrições e origens	50
Tabela 3.2 – Ensaio e normas para caracterização dos materiais	53
Tabela 3.3 – Composição química do CP V ARI, do MK e do RC	54
Tabela 3.4 – Resultados da massa específica real e aparente (unitária) do MK, CP V ARI, RCF, RCG e agregados naturais do Litoral e Sertão. Índice de forma e abrasão a Los Angeles do RCG e dos agregados naturais do litoral e do sertão	61
Tabela 3.6 – Composições em massa das misturas contendo CP V ARI, MK, RCF, RCG, Agr. Natural, água e aditivo plastificante	65
Tabela 3.7 – Métodos e ensaios, normas e quantidade de corpos de prova empregados nas misturas de pastas estudadas.....	66
Tabela 3.8 – Ensaio e normas para caracterização dos materiais	69
Tabela 4.1 – Parâmetros morfométricos obtidos no software CTAn (Bruker micro-CT, Kontich, Bélgica) para o volume de interesse (VOI) analisado	127
Tabela 4.2 – Aplicações multifuncionais e propriedades para diferentes misturas de concretos permeáveis contendo MK, RCF e RCG	143
Tabela 4.3 – Cenário de incorporação do resíduo de caulim em concreto permeável para uma geração diária de 8 t.....	145
Tabela 4.4 – Estimativa da mitigação de emissões de CO ₂ decorrente da substituição parcial do cimento por metacaulim nos concretos permeáveis estudados	146

LISTA DE QUADROS

Quadro A.1 – Teste de <i>Shapiro-Wilk</i> para análise da normalidade dos resultados de espalhamento	169
Quadro A.2 – Teste de <i>Kruskal-Wallis</i> para análise das médias dos espalhamentos	169
Quadro A.3 – Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dwass-Steel-Critchlow-Fligner</i> aplicado aos resultados de espalhamento	169
Quadro A.4 – Matriz de correlações da composição das pastas e espalhamento	169
Quadro A.5 – Matriz de correlação parcial das pastas e espalhamento	170
Quadro A.6 – Regressão linear múltipla: qualidade do ajuste do modelo	171
Quadro A.7 – Coeficientes da regressão	171
Quadro A.8 – Verificação dos pressupostos.....	171
Quadro A.9 – Estatística descritiva e teste de normalidade (<i>Shapiro-Wilk</i>) da resistência à flexão	171
Quadro A.10 – ANOVA de medições repetidas da resistência à flexão	172
Quadro A.11 – Testes post hoc (<i>Tukey</i>) entre idades da resistência à flexão.....	172
Quadro A.12 – Modelo de regressão linear múltipla para resistência à flexão aos 63 dias ...	172
Quadro A.13 – Estatística descritiva e teste de normalidade (<i>Shapiro-Wilk</i>) da resistência à compressão. Valores conforme disponibilidade amostral	172
Quadro A.14 – ANOVA de medições repetidas da resistência à compressão	172
Quadro A.15 – Modelo de regressão linear múltipla para resistência à flexão aos 63 dias ...	173
Quadro A.16 – Teste não paramétrico de <i>Kruskal-Wallis</i> para o índice de vazios dos concretos permeáveis referências aos 28 e 63 dias.....	173
Quadro A.17 – Comparações múltiplas pelo método <i>Dwass-Steel-Critchlow-Fligner</i> para o índice de vazios dos concretos permeáveis referências aos 28 dias	173
Quadro A.18 – Comparações múltiplas pelo método <i>Dwass-Steel-Critchlow-Fligner</i> para o índice de vazios dos concretos permeáveis referências aos 63 dias	173
Quadro A.19 – Teste não paramétrico de <i>Kruskal-Wallis</i> para as resistências à compressão e à flexão dos concretos permeáveis referências aos 28 e 63 dias	173
Quadro A.20 – Matriz de correlação dos resultados mecânicos das misturas de concretos permeáveis referências	175
Quadro A.21 – Teste não paramétrico de <i>Kruskal-Wallis</i> para o índice de vazios dos concretos permeáveis referências aos 28 e 63 dias.....	176
Quadro A.22 – ANOVA de medições repetidas aplicada ao coeficiente de permeabilidade a carga constante com efeito intra-sejeitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise aos 28 dias)	176
Quadro A.23 – ANOVA de medições repetidas aplicada ao coeficiente de permeabilidade à carga constante com efeito inter-sejeitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise aos 28 dias)	176
Quadro A.24 – Coeficiente de permeabilidade à carga constante aos 28 dias e comparação múltipla de médias dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (<i>Tukey</i> $p < 0,05$)..	176
Quadro A.25 – ANOVA de medições repetidas aplicada ao coeficiente de permeabilidade a carga constante com efeito intra-sejeitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise aos 63 dias)	177
Quadro A.26 – ANOVA de medições repetidas aplicada ao coeficiente de permeabilidade à carga constante com efeito inter-sejeitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise aos 63 dias)	177
Quadro A.27 – Coeficiente de permeabilidade à carga constante aos 63 dias e comparação múltipla de médias dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (<i>Tukey</i> $p < 0,05$)..	177

Quadro A.28 – ANOVA de medições repetidas aplicada ao coeficiente de permeabilidade a carga variável com efeito intra-sejueitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise aos 28 dias).....	178
Quadro A.29 – ANOVA de medições repetidas aplicada ao coeficiente de permeabilidade à carga variável com efeito inter-sejueitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise aos 28 dias).....	178
Quadro A.30 – Coeficiente de permeabilidade à carga variável aos 28 dias e comparação múltipla de médias dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (<i>Tukey</i> $p<0,05$)..	178
Quadro A.31 – ANOVA de medições repetidas aplicada ao coeficiente de permeabilidade a carga variável com efeito intra-sejueitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise aos 63 dias).....	178
Quadro A.32 – ANOVA de medições repetidas aplicada ao coeficiente de permeabilidade à carga variável com efeito inter-sejueitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise aos 63 dias).....	179
Quadro A.33 – Coeficiente de permeabilidade à carga variável aos 63 dias e comparação múltipla de médias dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (<i>Tukey</i> $p<0,05$)..	179
Quadro A.34 – Verificação dos pressupostos para as resistências à compressão dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG aos 28 e 63 dias	179
Quadro A.35 – Teste não paramétrico de <i>Kruskal–Wallis</i> para as resistências à compressão dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG aos 28 e 63 dias	179
Quadro A.36 – ANOVA de <i>Welch</i> para as resistências à flexão dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG aos 28 e 63 dias	180
Quadro A.37 – Teste não paramétrico de <i>Kruskal–Wallis</i> para as resistências perda de massa por abrasão de concretos permeáveis contendo RCF e RCG aos 28 e 63 dias.....	180
Quadro A.38 – Matriz de correlação dos resultados mecânicos das misturas de concretos permeáveis contendo RCF e RCG.....	181
Quadro A.39 – ANOVA de medições repetidas aplicada a adsorção de íons de alumínio com efeito intra-sejueitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG	182
Quadro A.40 – ANOVA de medições repetidas aplicada a adsorção de íons de alumínio com efeito com efeito inter-sejueitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG	182
Quadro A.41 – Matriz de correlação dos resultados de adsorção em alumínio das misturas de concretos permeáveis contendo RCF e RCG	183
Quadro A.42 – ANOVA de medições repetidas aplicada a adsorção de íons de ferro com efeito intra-sejueitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG	184
Quadro A.43 – ANOVA de medições repetidas aplicada a adsorção de íons de ferro com efeito com efeito inter-sejueitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG	184
Quadro A.44 – Matriz de correlação dos resultados de adsorção em ferro das misturas de concretos permeáveis contendo RCF e RCG	185

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, têm aumentado os impactos negativos decorrentes do crescimento populacional desordenado e da urbanização, resultando em problemas ambientais, como o aumento da poluição e a impermeabilização do solo (Fang *et al.*, 2019). Nesse cenário, se intensificam a contaminação das águas pluviais, a formação das ilhas de calor e a ocorrência das inundações, associadas à redução da taxa de infiltração e ao incremento do escoamento superficial, que contribuem significativamente para a desregulação do ciclo hidrológico (Fang *et al.*, 2019; Hou *et al.*, 2019; Nguyen *et al.*, 2019).

Essa sequência de eventos é particularmente comum em cidades que se encontram em processo de expansão urbana. Nesse contexto, países como China, Estados Unidos e França já incorporam em seus projetos urbanísticos o conceito da “infraestrutura ecológica”, com o intuito de promover um planejamento urbano resiliente aos problemas de origem hídrica (Benevenuto, 2018).

Entretanto, no Brasil, a aplicação da infraestrutura ecológica ainda é limitada, configurando uma lacuna a ser superada. Como exemplo recente dessa falta de planejamento hídrico pode-se destacar o evento que ocorreu em 2024, no estado do Rio Grande do Sul (região Sul do país), quando uma enchente deixou mais de 500 mil desabrigados e resultou em pelo menos 150 vítimas fatais (Rizzatti e Batista, 2024). Outra cidade brasileira que enfrenta desafios semelhantes é João Pessoa, no estado da Paraíba (região Nordeste do país), que se encontra em um processo acelerado de urbanização com apresentação de episódios frequentes de inundações (de Sousa *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2022), como o registrado em maio de 2026 que chegou a um índice pluviométrico 413,2 mm, cerca de 46% acima da média histórica, provocando alagamentos e prejuízos em diferentes áreas da cidade e em regiões metropolitanas (União, 2026). Em uma perspectiva global, eventos semelhantes têm ocorrido em outros países, evidenciando a vulnerabilidade mundial frente a chuvas extremas; por exemplo, na Espanha, em 2025, algumas regiões registraram cerca de 300 mm de chuva, provocando alagamentos generalizados (Spacemoney, 2025). Essas inundações resultaram em mais de 200 mortes e dezenas de desaparecidos, além de grandes destruições de infraestrutura urbana (BBC, 2025).

Para alcançar o objetivo da infraestrutura que atenda as demandas da urbanização e ao mesmo tempo possam ser soluções sustentáveis, estão sendo implementadas em diferentes cidades uma variedade de tecnologias de engenharia, que minimizam os efeitos das enchentes e do alagamento e contribuem para o desenvolvimento das “cidades-esponja” ou “cidades

resilientes à água”, consideradas essenciais para mitigar os impactos causados pelas mudanças climáticas (Yuan *et al.*, 2025). São exemplos dessas tecnologias: os telhados verdes, poços e trincheiras de infiltração, bacias de retenção e calçadas de concretos permeáveis, configurando sistemas hidráulicos descentralizados que auxiliam na mitigação dos efeitos problemáticos derivados dos alagamentos e enchentes (Song, 2022; Cai J *et al.*, 2022; Candian Filho *et al.*, 2021; Cai X *et al.*, 2022). Dessa forma, as paisagens urbanas acabam por possuir funções ecológicas que podem facilitar a infiltração e retenção das águas pluviais (Wong; Brown, 2009).

Nesse contexto, o concreto permeável tem se destacado como uma solução sustentável para os desafios da drenagem urbana, ao permitir a infiltração da água e a redução do escoamento superficial, sendo aplicado em calçadas e vias de tráfego leve, configurando-se como uma tecnologia verde capaz de promover a recarga dos lençóis freáticos. Estudos recentes têm investigado a incorporação de resíduos industriais, agregados reciclados e materiais cimentícios suplementares em concretos permeáveis, a exemplo do metacaulim, visando o aprimoramento das propriedades mecânicas e hidráulicas. Em geral, os estudos relatam resistências à compressão variando entre 2,5 e 38 MPa, com resistência à tração na flexão podendo chegar a 5 MPa e coeficientes de permeabilidade variando entre 1,5 mm/s e 10 mm/s. Entretanto, o comportamento das misturas varia em função do tipo de material incorporado e das alterações promovidas na estrutura de poros do material (Elizondo-Martínez *et al.*, 2020; Jindal *et al.*, 2022; Bilal *et al.*, 2021; Schackow *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2022a; Bualuang *et al.*, 2025; González-Martínez *et al.*, 2025; De La Colina Martínez *et al.*, 2026).

Apesar desses avanços, as pesquisas existentes ainda permanecem limitadas quanto ao comportamento multifuncional dos concretos permeáveis. Esse conceito abrange não apenas o desempenho mecânico e hidráulico, mas também a funcionalidade ambiental, particularmente a capacidade de reter ou remover contaminantes das águas pluviais, a qual pode ser potencializada por meio da incorporação de resíduos industriais (Bokade e Singh, 2025; Adab; Abbasi, 2024; Ahmadi *et al.*, 2023; Krishnan *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2025; Riekert *et al.*, 2025).

Nessa perspectiva, o resíduo de beneficiamento de caulim constitui um material composto por minerais do grupo da caulinita. Em função das suas características físico-química, esse material pode atuar tanto na modificação da microestrutura do concreto permeável quanto na retenção de contaminantes por adsorção. Estudos prévios indicam sua eficiência na remoção de compostos orgânicos, como óleos (Patrício, 2016). Isso reforça seu potencial de aplicação

em propostas de soluções voltadas ao tratamento de águas pluviais contaminadas em sistemas de drenagem urbana.

Um aspecto crítico relacionado à eficiência dos sistemas de drenagem urbana é o fenômeno do *first flush*, no qual uma fração significativa da carga poluente é transportada nos estágios iniciais dos eventos de precipitação (Perera *et al.*, 2021). Nesse período, ocorre elevada concentração de contaminantes dissolvidos e particulados, o que representa um desafio para materiais com função de tratamento descentralizado, como o concreto permeável. Segundo Mamun *et al.* (2020) os primeiros 30% do escoamento superficial podem transportar até 72,1% do total de sólidos suspensos, enquanto Mastouri *et al.* (2023) relataram que 30–50% do volume precipitado frequentemente contém a maior parte da carga poluente. Entre os principais contaminantes identificados nas águas pluviais destacam-se Pb, Zn, Cu, Cd, Al e Fe, frequentemente associados à deposição atmosférica de poluentes e à interação da água com superfícies urbanas e industriais (Chen *et al.*, 2024a; Mng'ong'o; Matimbwa, 2025). Adicionalmente, Popick *et al.* (2022) destacam tendências significativas de concentração de alumínio (Al^{3+}) e ferro (Fe^{2+}) entre os sólidos em suspensão presentes no escoamento pluvial.

Entre as propriedades ambientais do concreto permeável, a adsorção destaca-se como um mecanismo fundamental para reduzir as concentrações de contaminantes presentes nas águas pluviais. Nessa conjuntura, Krishnan *et al.* (2022), Li *et al.* (2024) e Azad *et al.* (2025) avaliaram a capacidade adsortiva do concreto permeável imerso em soluções contaminadas com íons de metais pesados, e registrando remoções de até 80% dos poluentes após 24 horas de análise. Observa-se, contudo, que apesar dos avanços recentes, ainda há limitações no entendimento do comportamento multifuncional dos concretos permeáveis, especialmente no que se refere à sua eficiência de remoção de contaminantes nos estágios iniciais de precipitação. Assim, o desempenho adsortivo nas primeiras horas, período em que ocorre o fenômeno de *first flush*, destaca-se como uma lacuna científica.

Dessa forma, este trabalho propõe investigar o potencial multifuncional de concretos permeáveis contendo materiais gerados a partir do processo de beneficiamento do caulim, considerando aspectos hidráulicos, mecânicos e adsortivos no período *first flush*, com foco no tratamento descentralizado de águas pluviais e práticas construtivas sustentáveis aplicáveis a calçadas e em vias de tráfegos leves.

1.1 Justificativa

Frente às problemáticas derivadas da poluição, da impermeabilização dos solos e do gerenciamento dos resíduos do beneficiamento do caulim, bem como aos desafios no desenvolvimento do concreto permeável multifuncional, justifica-se este estudo, que tem como principal contribuição científica o conhecimento acerca do potencial adsorativo dos concretos permeáveis no fenômeno do *first flush*, sobretudo em misturas que incorporam pozolanas (metacaulim) e resíduos industriais (frações finas e grossas do caulim).

A propriedade adsorativa pode ser potencializada com a introdução de materiais específicos, como resíduos industriais, a exemplo do resíduo de caulim. Nesse contexto, sua estrutura lamelar e a composição caulínica do resíduo sustentam seu possível potencial adsorativo, que, associadas à estrutura porosa do concreto permeável, podem contribuir com a remoção de contaminantes nas primeiras horas de chuva.

No que se refere ao resíduo de caulim, o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) apresentou que, em 2024, as exportações de caulim atingiram aproximadamente 898.068 toneladas, representando um aumento de 23,1% em relação a 2023, sendo sua maior aplicação na fabricação de louças e produção pigmentos. Esses valores são consistentes com os dados reportados pelo *World Mineral Production*, que indicam que a produção global de caulim tem variado ao longo dos anos, alcançando cerca de 30,2 milhões de toneladas em 2019, aproximadamente 28,6 milhões de toneladas em 2023 e cerca de 28 milhões de toneladas em 2024 (Idoine *et al.*, 2025). Embora essas quantidades tenham diminuído com os anos, existe uma elevada produção e comercialização desse mineral, resultando em um maior volume de resíduos gerados durante o processo de beneficiamento do caulim (IndexBox, 2025).

No Brasil, particularmente na região do Seridó, que abrange os estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba (Nordeste do Brasil), o caulim é amplamente extraído. No entanto, o processamento desse mineral leva à geração significativa de resíduos. Aproximadamente 75% do caulim extraído nessa região é perdido durante o processamento, conforme relatado por Patrício (2016), resultando na geração de grandes quantidades de resíduos de caulim finos (RCF) e grossos (RCG), o que evidencia um importante desafio ambiental para a região.

Assim, busca-se avaliar a capacidade adsorativa de um concreto permeável contendo metacaulim e adições de resíduo de caulim, visando à remoção de íons de Al^{3+} e Fe^{2+} presentes em águas contaminadas (simuladas em laboratório), aliando o desempenho mecânico, físico e

hidráulico do concreto permeável a um sistema multifuncional e descentralizado de tratamento de águas pluviais.

Essa abordagem pode contribuir para o desenvolvimento de práticas construtivas mais sustentáveis e promove a economia circular na destinação do resíduo de caulim. Além disso, trata-se de uma pesquisa que envolve diferentes áreas da engenharia civil, sendo considerada multidisciplinar e alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e ODS 12 (Consumo e Produções Responsáveis) (United Nations, 2015).

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho de tese estão divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Investigar as propriedades físicas, hidráulicas, mecânicas, adsorptivas de concretos permeáveis produzidos com a incorporação de metacaulim como material suplementar do cimento e resíduos de caulim como material funcional.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar o comportamento das pastas cimentícias, nos estados fresco e endurecido, contendo metacaulim como adição e também como substituto do cimento Portland.
- Avaliar os efeitos da incorporação de resíduos de caulim no desempenho mecânico e hidráulico de concretos permeáveis nos estados fresco e endurecido.
- Investigar a contribuição dos resíduos de caulim como materiais precursores na adsorção de íons de alumínio e ferro, visando à aplicação multifuncional dos concretos permeáveis estudados.

1.3 Hipóteses

Se apresentam como hipóteses para este trabalho o seguinte:

- Pastas cimentícias com adições e/ou substituições de metacaulim regional contribuem para a formação de uma matriz cimentícia que proporciona aos concretos permeáveis melhor desempenho mecânico e hidráulico;

- A incorporação de resíduos de caulim nas frações finas e grossas favorece o empacotamento granular das misturas de concretos permeáveis, contribuindo para a melhoria das propriedades mecânicas sem comprometer as propriedades hidráulicas.
- A presença de resíduos de caulim nas misturas de concretos permeáveis promove a formação de superfícies com maior rugosidade e partículas lamelares aderidas que podem potencializar a adsorção de íons metálicos presentes em águas.

1.4 Inovação e originalidade da tese

A inovação desta tese está na abordagem integrada aplicada aos concretos permeáveis multifuncionais, superando as abordagens tradicionais centradas apenas no desempenho mecânico e hidráulico desses materiais.

A tese propõe a incorporação simultânea de metacaulim com resíduos de caulim nas frações finas (RCF) e grossas (RCG) em misturas de concretos permeáveis, não apenas como materiais granulares, mas como materiais funcionais com potencial adsorativo e de empacotamento. Essa abordagem pode ampliar o papel tradicional dos agregados em concretos permeáveis, introduzindo uma função ambiental associada à mitigação de poluentes presentes em águas pluviais contaminadas e possibilitando o enquadramento desses materiais sob a perspectiva da multifuncionalidade.

Diferentemente dos estudos existentes, esta pesquisa parte da análise sistemática das pastas cimentícias que compõem os concretos permeáveis, investigando o efeito da incorporação do metacaulim como material cimentício suplementar desde a escala de pasta até o desempenho do concreto final.

Dessa forma, a tese contribui de maneira original para o avanço do conhecimento científico ao propor uma abordagem integrada entre desempenho estrutural, funcionalidade hidráulica e potencial ambiental em concretos permeáveis contendo metacaulim e resíduos derivados do beneficiamento do caulim.

1.5 Estrutura da tese

Esta tese está organizada em cinco capítulos, descritos a seguir:

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO: Apresenta a contextualização do tema, a problemática de pesquisa, a justificativa, os objetivos, as hipóteses, as inovações e o enquadramento do estudo

como tese de doutorado. Este capítulo tem por finalidade introduzir o leitor à temática central da pesquisa e evidenciar a relevância científica do trabalho desenvolvido.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: Reúne o estado da arte sobre concretos permeáveis, abordando suas principais características e propriedades nos estados fresco e endurecido. Adicionalmente, apresenta uma revisão bibliográfica sobre as propriedades e o potencial de aplicação dos resíduos de caulim. Este capítulo fornece o embasamento teórico necessário para a interpretação dos resultados e discussões subsequentes.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS: Descreve os materiais utilizados na pesquisa, os processos de obtenção e preparação, bem como os métodos e procedimentos experimentais adotados para a obtenção dos resultados.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES: Apresenta e discute os resultados obtidos por meio dos métodos descritos no Capítulo 3. As análises são realizadas de forma comparativa e fundamentadas na literatura revisada, incluindo o tratamento estatístico dos dados.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES: Apresenta as principais conclusões da pesquisa, destacando as contribuições científicas do estudo, suas implicações práticas e sugestões para trabalhos futuros.

Além dos capítulos mencionados, o trabalho inclui as referências bibliográficas e o Apêndice A, que apresenta de forma detalhada os resultados das análises estatísticas.

CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Concreto permeável: fundamentos e características gerais

2.1.1 Conceitos, definições e características gerais

O concreto permeável, também denominado na literatura internacional como *pervious concrete* ou *porous concrete*, é definido segundo o *American Concrete Institute* (ACI 522R–10, 2010) como um concreto poroso com vazios interconectados que facilitam a passagem de água pela superfície. Esta definição está alinhada com a proposta da NBR 16416 (ABNT, 2015), que descreve o concreto permeável como um material que possui vazios interligados e permite a percolação da água por ação gravitacional. Lamb (2014) complementa, destacando o caráter sustentável desse material, que diminui o escoamento superficial, melhora a recarga de águas subterrâneas e reduz os impactos urbanos. Tais características distinguem o concreto permeável dos concretos convencionais utilizados em pavimentação tradicional.

A composição do concreto permeável inclui pouco ou nenhum agregado fino. Assim, o concreto permeável é constituído essencialmente por agregados graúdos, cimento Portland, água e, eventualmente, adições minerais ou aditivos químicos. A pasta cimentícia atua como elemento de ligação entre os agregados, formando pontes de contato que garantem a coesão do material, ao mesmo tempo que forma uma estrutura porosa com macroporos interconectados que facilitam o fluxo de fluidos (Cai *et al.*, 2021).

2.1.2 Proporções de dosagem

As características granulométricas dos agregados e a proporção dos materiais exercem influência direta na formação da rede de poros e, conseqüentemente, no desempenho hidráulico e mecânico do concreto permeável.

Sobre as proporções dos materiais observa-se que as misturas empregadas na literatura apresentam variações significativas, principalmente em função das propriedades mecânicas e hidráulicas desejadas para o material. Em geral, as relações cimento:agregado variaram entre 1:2 e 1:5, enquanto as relações água/cimento oscilaram entre 0,25 e 0,44.

Candian Filho *et al.* (2022), ao investigarem concretos permeáveis contendo areia descartada de fundição, utilizaram a proporção 1:4,28:0,4. De forma semelhante, Batezini *et al.* (2021) adotaram traço 1:4:0,44 em avaliações laboratoriais e de campo de pavimentos permeáveis. Martins Filho *et al.* (2020), por sua vez, estudaram diferentes proporções, variando

entre 1:2:0,3 e 1:2,9:0,3, visando à caracterização do concreto permeável com foco em ensaios não destrutivos.

Outros autores, como Costa *et al.* (2018), Pils *et al.* (2019) e Tavares e Kazmierczak (2016), empregaram proporções próximas a 1:4, associadas a relações água/cimento de aproximadamente 0,25 a 0,30. Já Sandoval *et al.* (2019), ao avaliarem concretos permeáveis produzidos com escória, utilizaram uma relação cimento:agregado de 1:5 e relação água/cimento de 0,25.

Ainda nesse contexto, Faria *et al.* (2019) investigaram o desempenho drenante e mecânico de concretos permeáveis que incorporaram agregados naturais. Após análises de diferentes proporções, o autor identificou que a mistura na proporção de 1:4 (aglomerante:agregado graúdo) obteve os melhores resultados mecânicos sem comprometer o coeficiente de permeabilidade do sistema. Essas proporções foram replicadas em diversos estudos, como os realizados por Batezini *et al.* (2021), Costa *et al.* (2019) e Pils *et al.* (2018).

Apesar das proporções de agregado e aglomerante serem idênticas, os componentes usados em cada pesquisa variaram em tipo, forma e granulometria. Isso resultou em diferentes fatores água/cimento (a/c), que geralmente variaram entre 0,3 e 0,4, conforme pesquisas de Candian Filho *et al.* (2022), Martins Filho *et al.* (2020), Costa *et al.* (2019), Faria *et al.* (2019), Tavares e Kazmierczak (2016) e Batezini e Balbo (2015). No entanto, relações de a/c inferiores a 0,3 foram encontradas nos estudos de Pils *et al.* (2019) e Sandoval *et al.* (2019). Essas relações mais baixas resultaram em misturas mais secas com baixa trabalhabilidade, dificultando o manuseio e a aplicação do material.

Esses resultados evidenciam a ausência de uma dosagem única para concretos permeáveis, sendo a definição do traço diretamente influenciada pelos materiais utilizados e pelo equilíbrio desejado entre resistência mecânica e permeabilidade. De acordo com Alves (2016), essa realidade decorre da falta de normas técnicas que estabeleçam diretrizes claras para os procedimentos de dosagem. Assim, a maioria das informações disponíveis provém de revisões da literatura e estudos experimentais.

2.1.3 Influência da granulometria e geometria dos agregados

Além de impactar o estado fresco, as diferentes proporções entre os materiais, assim como seus tipos influenciaram diretamente os resultados de permeabilidade e resistência dos concretos permeáveis. Por exemplo, Batezini *et al.* (2021) utilizaram a composição 1:4:0,44 variando a dimensão máxima do agregado graúdo (9,5 mm; 6,3 mm e 4,8 mm), e obtiveram a

maior resistência à compressão (8,68 MPa) para a amostra que utilizou o agregado de 6,3 mm de diâmetro máximo.

Nessa perspectiva, Pils *et al.* (2019) também variaram as proporções de agregados com diferentes diâmetros em suas misturas e constataram que as amostras de concreto permeável que utilizaram agregados graúdos de menores diâmetros máximos alcançaram maiores resistências e menores coeficientes de permeabilidade. Os autores justificam esse ocorrido devido à forma dos grãos dos agregados graúdos, que nas misturas que utilizaram grãos de menores diâmetros atingiram maior empacotamento e, conseqüentemente, maior resistência e menor permeabilidade.

2.1.4 Estrutura de vazios, permeabilidade e propriedades mecânicas

Ainda sobre as características dos concretos permeáveis, Kia *et al.* (2017) destacam a permeabilidade como a propriedade mais importante, uma vez que tem a função de escoar águas pluviais e amenizar problemas causados por inundações. Adicionalmente, Martins Filho *et al.* (2020) referem-se à permeabilidade como sendo uma propriedade intrínseca do concreto permeável, pois permite a passagem de um fluido por meio de sua matriz, que, conforme Monteiro (2010), pode ser por filtração, por difusão ou sob pressão.

Assim, pode-se inferir que a principal característica funcional desse material é sua elevada capacidade de infiltração de água, que pode atingir valores significativamente superior aos observados em pavimentos convencionais, devendo apresentar coeficientes mínimos de permeabilidade superiores a 1,0 mm/s, conforme a NBR 16416 (2015), e a 1,5 mm/s segundo a ACI 522R-10 (2010).

Entretanto, para obter essas características e ser classificado como permeável, o concreto deve ter um volume de vazios significativo, geralmente entre 15% e 20% (Aquino *et al.*, 2019; Sandoval *et al.*, 2019). No entanto, Batezini *et al.* (2021) e Martins Filho *et al.* (2020) observaram em suas pesquisas índices de vazios na ordem de 30%. Embora exista uma variação nas porcentagens desse índice, um padrão se torna comum entre as pesquisas: a necessidade de que esses vazios se comuniquem, formando pequenos canais internos e permitindo a passagem da água (Aquino *et al.*, 2019). Nesse contexto, Schwetz *et al.* (2015) acrescentam que, para a produção do concreto permeável é muito importante que os vazios sejam interconectados, sendo esse um fator fundamental para garantir a permeabilidade das águas pluviais.

A elevada porosidade do concreto permeável impacta diretamente na redução de sua resistência mecânica, configurando uma relação intrínseca entre desempenho hidráulico e

mecânico. Isso ocorre porque o aumento do volume de vazios interconectados reduz a área efetiva de contato entre os agregados e a pasta cimentícia, resultando em menor capacidade de transferência de tensões e maior suscetibilidade à propagação de fissuras. Dessa forma, embora os elevados índices de vazios sejam fundamentais para garantir a infiltração da água, eles também representam uma das principais limitações tecnológicas desse material.

Em razão dessa característica, os concretos permeáveis são geralmente aplicados em pavimentos submetidos a tráfego leve ou moderado, como calçadas, estacionamentos, ciclovias, praças, áreas residenciais e vias de baixo volume de tráfego. De acordo com a ACI 522R-10 (2010), concretos permeáveis normalmente apresentam resistência à compressão variando entre 2,8 MPa e 28 MPa, dependendo da composição da mistura e das condições de adensamento.

Dessa forma, existe um controle do empacotamento granular, da relação água/cimento e da consistência da pasta cimentícia para alcançar um equilíbrio adequado entre desempenho mecânico e hidráulico. Pesquisas como as de Cardian Filho *et al.* (2022); Batezini *et al.* (2021) e Xu Cai *et al.* (2021) demonstram que a resistência à compressão deste material é inferior à dos concretos convencionais, variando de 7,51 MPa a 27,60 MPa, majoritariamente devido ao maior volume de vazios.

No que se refere à resistência à tração na flexão, estudos como o de Batezini (2015) indicam que os valores para concretos permeáveis também são inferiores aos dos concretos convencionais, visto também em pesquisas recentes como as de Fei *et al.* (2024) e Liu *et al.* (2024). Além disso, poucos estudos abordam a perda de massa por abrasão e resistência à tração por compressão diametral, embora estudos como os de Batezini *et al.* (2021) e Pils *et al.* (2019) tenham encontrado valores significativos, especialmente quando agregados ou fibras são utilizados.

Observa-se a variedade de resultados que podem ser alcançados nas propriedades dos concretos permeáveis. Nesse ínterim, a Tabela 2.1 – Características de concretos permeáveis para diferentes pesquisas apresenta de forma sintética uma sequência de pesquisas que incorporaram diferentes materiais, como resíduos e materiais cimentícios suplementares em misturas de concretos permeáveis, sendo indicados o tema da pesquisa, o ano (2019-2025), os autores e a faixa de resultados das principais propriedades dessas misturas.

Tabela 2.1 – Características de concretos permeáveis para diferentes pesquisas

Título	Ano	Autores	Porosidade (%)	Permeabilidade (mm/s)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)
Investigação das características mecânicas e hidráulicas do concreto permeável contendo escória de cobre como agregado graúdo.	2019	Lori <i>et al.</i>	20-25	3,36	23,45	3,16-3,76
Propriedades do concreto permeável incorporando agregados reciclados de concreto e escória.	2019	El-Hassan <i>et al.</i>	10-20	2-21	3-37	0,95-3,15
Propriedades do concreto permeável com escória de aço como agregado e diferentes adições minerais como ligantes.	2020a	Zhang <i>et al.</i>	20-35	13	32	Não informado
Caracterização do concreto permeável utilizando tijolo superqueimado como agregado graúdo.	2020	Debnath, B.; Sarkar, P. P.	5-24	12-21	3-10	0,5-3,3
Desenvolvimento de concreto permeável de alta resistência incorporando elevados teores de vidro residual.	2020	Shen <i>et al.</i>	14-28	0,7	33	Não informado
Características hidráulicas e de resistência do concreto permeável contendo elevado volume de resíduos da construção e demolição como agregados.	2020	Ibrahim <i>et al.</i>	15-17,37	25,3	11	Não informado
Influência da substituição por agregado reciclado e do teor de cinza volante no	2020	Vieira <i>et al.</i>	Não informado	3,5-7,5	3-13	Não informado

Título	Ano	Autores	Porosidade (%)	Permeabilidade (mm/s)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)
desempenho de misturas de concreto permeável.						
Utilização de agregados provenientes de cinzas de fundo da incineração de resíduos sólidos urbanos (IBA) em concreto permeável de alta resistência.	2021	Shen <i>et al.</i>	16-26	0,6	20	Não informado
Comportamento mecânico e infiltração de água em concreto permeável incorporando agregado reciclado de pavimento asfáltico.	2021	Bittencourt et al	22-26	10	3,7	1-2,3
Resistência mecânica, resistência à abrasão e permeabilidade de concreto permeável com agregado artificial de cinza volante.	2021	Sherwani et al	24-33	9,3	11,1	Não informado
Melhoria das propriedades mecânicas do concreto permeável com agregado reciclado por meio da adição de sílica ativa.	2021	Chaitanya, M.; Ramakrishna, G.	Não informado	8,8-16,3	3,16-3,87	1,7-2,3
Efeito do pó de pedra-pomes e da nanoargila na resistência e permeabilidade do concreto permeável reforçado com fibras e agregado reciclado de concreto.	2021	Mehrabi, P. <i>et al.</i>	Não informado	21-35	2,8-28	1,5-3,5
Efeito do metacaulim nas propriedades do concreto permeável	2022b	Singh <i>et al.</i>	15-22	6-13	27-42	4,46-4,57

Título	Ano	Autores	Porosidade (%)	Permeabilidade (mm/s)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)
Propriedades do concreto permeável verde à base de metacaulim curado em condições climáticas frias e normais	2022	<i>Azad et al.</i>	15-25	1-10	10-35	2-5
Estudo sobre resistência, permeabilidade e microestrutura de concreto permeável incorporando metacaulim	2023	<i>Rama et al.</i>	14-28	0,4-1,2	12-15	Não informado
Influência da pozolana de argila queimada e do tamanho do agregado nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto permeável	2023	Boakye, K; Khorami, M.	15-25	8-20	30-40	3-6
Influência do metacaulim na resistência do concreto permeável: uma abordagem de aprendizado de máquina com explicações aditivas de Shapley	2024	<i>Sathiparan et al.</i>	15-28	1-12	10-35	2,5-5
Reciclagem de tijolos de argila triturado para uso em concreto permeável: características mecânicas e hidráulicas, comportamento de entupimento e manutenção	2025	<i>Ahmed et al.</i>	10-24	8-20	7-17	2,3-4,5
Avaliação do impacto de agregados de concreto reciclado e Metacaulim sobre as propriedades mecânicas do concreto Permeável	2025	<i>Kumar et al.</i>	15-27	2-11	12-38	2,8-4,8

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

Os estudos apresentados evidenciam que misturas com maiores índices de vazios apresentaram maior capacidade de infiltração de água, porém com redução da resistência à compressão e à flexão. Essa tendência é observada em pesquisas que utilizaram agregados reciclados, resíduos cerâmicos, escórias e resíduos da construção civil, os quais favoreceram a formação de vazios interconectados e, conseqüentemente, o aumento da permeabilidade (Lori *et al.*, 2019; El-Hassan *et al.*, 2019; Debnath; Sarkar, 2020; Shen *et al.*, 2020; Ibrahim *et al.*, 2020; Shen *et al.*, 2021)

Por outro lado, a incorporação de materiais pozolânicos, especialmente o metacaulim, mostrou-se eficiente na melhoria das propriedades mecânicas sem comprometer significativamente o desempenho hidráulico. Estudos como os de Singh *et al.* (2022a), Boakye e Khorami (2023) e Kumar *et al.* (2025) demonstraram que o uso de metacaulim contribuiu para o refinamento da microestrutura cimentícia e para a melhoria da zona de transição pasta/agregado, resultando em resistências à compressão superiores a 30 MPa, mantendo permeabilidades adequadas para concretos permeáveis.

De maneira geral, os resultados encontrados na literatura permanecem compatíveis com os intervalos normalmente recomendados para concretos permeáveis pela NBR 16416 (ABNT, 2015) e ACI 522R (2010), que incluem porosidade entre 15% e 30%, permeabilidade variando aproximadamente de 1 a 20 mm/s e resistência à compressão entre 5 e 28 MPa para aplicações convencionais. Alguns estudos apresentaram desempenhos superiores a esses valores, indicando o avanço no desenvolvimento de concretos permeáveis de alta resistência associados ao uso de adições minerais e resíduos industriais. Assim, observa-se uma tendência crescente de produção de concretos permeáveis que conciliam desempenho hidráulico, resistência mecânica e sustentabilidade ambiental.

Diante da ampla produção científica existente sobre concretos permeáveis, envolvendo diferentes materiais, torna-se essencial a análise do estado da arte, a fim de compreender as tendências atuais de pesquisa e embasar a discussão dos resultados desta tese. O próximo tópico apresenta essa análise.

2.2 Panorama atual dos estudos sobre concreto permeável sustentável

As pesquisas atuais sobre concretos permeáveis se desenvolvem com diferentes tendências, a exemplo do uso de fibras, aditivos, materiais cimentícios suplementares e resíduos reciclados. Dessa forma, existe um direcionamento das pesquisas voltado à sustentabilidade,

que busca reduzir os impactos ambientais da construção civil por meio da incorporação de resíduos e materiais alternativos. Os tópicos a seguir abordam sobre esse panorama.

2.2.1 Uso de fibras em concretos permeáveis

Nesse contexto, Reyad *et al.* (2024) e Singh *et al.* (2022a) demonstraram que a incorporação de fibras de polipropileno (FPP) melhora a resistência à flexão do concreto permeável, embora tenha reduzido a permeabilidade e a porosidade da mistura. Em um estudo paralelo, Xia *et al.* (2024) observaram um aumento de 120% na resistência à compressão em misturas de concretos permeáveis que incluíam FPP, resíduos de agregados reciclados e cinzas volantes, com uma diminuição do seu coeficiente de permeabilidade.

Reyad *et al.* (2024) e Singh *et al.* (2022a) obtiveram resultados de resistência à flexão de 4,95 MPa e 4,3 MPa e alcançaram coeficientes de permeabilidade, com valores de 6 mm/s e 5,1 mm/s, respectivamente. Em contrapartida, Xia *et al.* (2024), que não realizaram testes de resistência à flexão, alcançaram resistência à compressão em torno de 40 MPa (resultado superior ao dos convencionais encontrados em concretos permeáveis) e apresentaram resultados de permeabilidade de 1,52 mm/s. Tanto Reyad *et al.* (2024) quanto Xia *et al.* (2024) utilizaram fibras de polipropileno em suas composições. Contudo, a diferença entre essas pesquisas esteve na incorporação de agregado reciclado nas misturas de Xia *et al.* (2024). Por outro lado, Singh *et al.* (2022a) utilizaram materiais suplementares como cinza de casca de arroz e sílica ativa.

2.2.2 Utilização de materiais cimentícios suplementares e adições minerais

Quanto ao uso de adições minerais, Mousavi *et al.* (2018) e Doostmohamadi *et al.* (2018) investigaram a eficácia da zeólita, perlita e pedra-pomes em misturas de concretos permeáveis. Os resultados indicaram que a zeólita foi a adição mais eficiente, melhorando significativamente a trabalhabilidade da mistura em seu estado fresco, a resistência mecânica e a capacidade hidráulica dessas misturas. Além disso, há estudos, como o de Lin *et al.* (2022), que exploram a adição de polímeros para aprimorar as características mecânicas dos concretos permeáveis, visando melhorias adicionais nas propriedades estruturais.

Em uma outra abordagem, sabe-se que o concreto permeável é constituído de duas fases, sendo elas: a fase de agregado gráudo e a fase de pasta cimentícia. Com o objetivo de melhorar o desempenho dessa pasta, pesquisas como as de Delnavaz *et al.* (2024) e Latha *et al.* (2019) investigaram as propriedades mecânicas e hidráulicas de misturas de concretos permeáveis com

pozolanas. Nesse contexto, Araújo (2019) estudou o comportamento mecânico e drenante de concretos permeáveis quando fez a substituição parcial do cimento por metacaulim. Após testes em misturas com 15% de metacaulim em relação à massa de cimento, foi constatado um aumento de 25% na resistência à compressão, enquanto os valores referentes à resistência à flexão e à taxa de infiltração foram similares aos da mistura de referência.

Jindal e Ransinchung (2022) seguiram uma metodologia similar ao introduzir pozolanas investigando as propriedades mecânicas de concretos permeáveis com a presença de agregados reciclados e adições minerais de cinzas volantes, casca de arroz e bagaço de cana-de-açúcar. Após análise mecânica, concluiu-se que houve aumento de 15% a 25% na resistência à compressão e à flexão das misturas com adições minerais. No entanto, enquanto as pozolanas trazem benefícios de resistência mecânica, elas também podem promover um maior empacotamento entre os grãos, causando um refinamento dos poros e, conseqüentemente, uma diminuição nos valores de permeabilidade, como foi constatado por Jindal e Ransinchung (2022).

Li *et al.* (2017) alcançaram a maior resistência à compressão, em que a amostra contendo concreto de pó reativo (CPR), cinzas volantes (CV), sílica ativa (SA), superplastificante e fibras de polipropileno atingiu aos 28 dias valores superiores a faixa de resultados típicas dos concretos permeáveis tradicionais (5,5 a 40 MPa), mantendo permeabilidades superiores a 12 mm/s. A combinação de pozolanas criou uma matriz com melhor empacotamento e desempenho, e as fibras auxiliaram no aumento da resistência mecânica em aproximadamente 50% em comparação com amostras que utilizaram apenas pozolanas. Além disso, não ocorreu o comprometimento da permeabilidade do sistema.

Por outro lado, observou-se uma menor resistência nos concretos permeáveis que utilizaram apenas um tipo de pozolana, como nos estudos de Delnavaz *et al.* (2024), Latha (2019) e Liu *et al.* (2019), com resistências à compressão de 32,1 MPa, 24,59 MPa e 25,30 MPa, respectivamente, e permeabilidades de 5,16 mm/s, 20,6 mm/s e 3,79 mm/s. Entre essas pesquisas, apenas os estudos de Latha *et al.* (2019) e Liu *et al.* (2019) realizaram ensaios de resistência à flexão, obtendo resultados de 3,12 MPa e 5,19 MPa, respectivamente.

Em particular, Delnavaz *et al.* (2024) alcançaram o melhor desempenho com uma substituição de 10% do cimento por cinzas volantes e escória. De maneira similar, Latha *et al.* (2019), que também utilizaram cinzas volantes, observaram que essa adição contribuiu principalmente para incrementos na resistência à flexão. Ademais, Liu *et al.* (2019) incluíram

sílica ativa em suas misturas, sendo as composições com 9% dessa pozolana as que apresentaram os melhores resultados.

Conforme Mohammed *et al.* (2016), que haviam realizado também estudos com uso de sílica ativa nas proporções de 5% e 25%, o teor ótimo foi de 5%, alcançando uma resistência à flexão de 3,25 MPa e uma permeabilidade de 12,45 mm/s, valor esse três vezes maior que o obtido por Liu *et al.* (2019), devido à menor porcentagem de pozolanas que pode ter derivado em menor refinamento dos poros.

2.2.3 Incorporação de resíduos industriais e resíduos da construção civil

Além da utilização de fibras e pozolanas, as pesquisas atuais buscam analisar as propriedades de concretos permeáveis contendo resíduos industriais. Nessa conjuntura, Schackow *et al.* (2020) utilizaram resíduos da indústria de papel em substituições parciais ao cimento nas proporções de 0%, 5% e 10%. Os concretos resultantes apresentaram resistência à flexão variando entre 2,18 MPa e 2,42 MPa. De forma semelhante, Alves (2016) realizou substituições de resíduos de construção e demolição (RCD) nas proporções de 5%, 10% e 15% em relação ao agregado natural, obtendo resistências à compressão entre 11,61 MPa e 15,33 MPa. A introdução do RCD implicou em um decréscimo da resistência mecânica, fato que fez aumentar o índice de vazios e do coeficiente de permeabilidade em comparação com a amostra de referência. Nessa mesma linha de estudo, pode-se citar a pesquisa de Vidal (2014), que substituiu 100% dos agregados graúdos naturais por agregados reciclados de RCD, obtendo uma resistência à compressão média de 7,88 MPa (aos 28 dias).

Ainda sobre a introdução de resíduos nessas misturas, Fernandes (2019) investigou as propriedades mecânicas e drenantes de concretos permeáveis contendo resíduos de concretos de pós-reativo (CPR). A metodologia empregada avaliou oito misturas de concreto permeável, obtendo respostas de resistência à compressão que variaram entre 18,21 MPa e 38,19 MPa (aos 28 dias). Além disso, os concretos apresentaram elevada permeabilidade, com valores entre 1,7 mm/s e 7,77 mm/s, evidenciando o potencial do CPR como material para produção de concreto permeável.

Outro estudo relevante é o de Lôbo e Silva (2021), que analisou concretos permeáveis contendo agregado miúdo natural e cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), em pequenas porcentagens, variando de 0 a 20%. Após os testes de resistência à compressão, verificou-se que a mistura com 20% de substituição apresentou os melhores resultados em comparação com a mistura de referência.

Em um aspecto geral, observa-se uma correlação inversa entre a permeabilidade e a resistência à compressão. Por exemplo, Li *et al.* (2023b) alcançaram a maior resistência à compressão, com 55,7 MPa, mas registraram uma permeabilidade de apenas 1,5 mm/s, provavelmente devido ao uso de resina epóxi nas misturas, que garantiu maior entrosamento adesivo entre as partículas. Diferentemente, Punyasurb *et al.* (2023) que utilizaram resíduo de vidro como agregado graúdo e alcançaram uma alta permeabilidade de 15,2 mm/s, porém, uma das menores resistências à compressão, 6,83 MPa.

Ainda nessa conjuntura, Yang *et al.* (2023) registraram uma baixa permeabilidade (1,65 mm/s) para uma resistência à compressão de 22,4 MPa. Eles observaram que a adição de TiO₂/LDHs reduziu a porosidade em 20% aumentou a resistência à compressão em 40% em relação às amostras de referência. Comportamento semelhante foi observado nas pesquisas de Cai *et al.* (2022) e Ng *et al.* (2019), que obtiveram permeabilidades de 1,77 mm/s e 3,51 mm/s, respectivamente, com resistências à compressão de 35 MPa e 5,03 MPa. Cai *et al.* (2021) adicionaram agregado de concreto reciclado, reduzindo a densidade e aumentando a absorção de água dos agregados, o que impactou negativamente o desempenho hidráulico do concreto. Ng *et al.* (2019) utilizaram borracha triturada, comprometendo o desempenho drenante do concreto permeável.

2.2.4 Desempenho hidráulico e aplicações em drenagem urbana

O desempenho dos concretos permeáveis também está relacionado com seu uso frente a picos pluviométricos. Assim, as pesquisas de Cai *et al.* (2022) e Yang *et al.* (2022) investigaram métodos de limpeza para restaurar a capacidade de infiltração de sistemas de pavimentos permeáveis que estavam entupidos. Nesse contexto, Lin *et al.* (2016) avaliaram o desempenho contra entupimento do concreto permeável ao longo dos anos, registrando uma redução acumulada na permeabilidade de 44% após cinco anos, estabilizando em torno de 70% nos anos subsequentes.

Esse cenário evidencia a necessidade de estratégias de dosagem, controle granulométrico e modificação da matriz cimentícia que permitam otimizar simultaneamente a permeabilidade, a resistência mecânica e a durabilidade do material. Essas questões são tratadas no tópico a seguir, que abordará os principais métodos utilizados para verificação das propriedades dos concretos permeáveis.

A partir da análise do estado da arte, pode-se inferir que há uma tendência dos estudos a incorporar resíduos e pozolanas nas misturas de concretos permeáveis. Nesta pesquisa foram

utilizados resíduos de caulim e metacaulim. Além disso, observa-se que assim como no concreto permeável o desempenho hidráulico depende diretamente da estrutura porosa e do volume de vazios interconectados, e assim como nos concretos convencionais o volume de vazios é determinante para o desempenho mecânico.

2.3 Métodos de verificação das propriedades dos concretos permeáveis

As características peculiares dos concretos permeáveis, como a sua alta porosidade e vazios interconectados, exigem a adoção de métodos específicos para verificar suas propriedades. No entanto, as principais normas que tratam de concretos permeáveis, como as ACI 522R-10 (2010) e NBR 16416 (ABNT, 2015), não estabelecem esses procedimentos padronizados para a caracterização de todas as suas propriedades, mas apenas diretrizes gerais. Diante disso, as pesquisas sobre concretos permeáveis acabam aplicando os métodos de verificação usados nos concretos convencionais, realizando as adaptações necessárias (Zhong *et al.*, 2018).

No estado fresco, a verificação da trabalhabilidade é comumente realizada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*). Nessa perspectiva, as normas ACI 522R-10 (2010) e NBR 16416 (ABNT, 2015) estabelecem abatimentos entre 0 e 20 mm, assim como os encontrados nos estudos de Bauer (2020) e Sandoval (2019). Esse comportamento é evidenciado devido ao baixo teor de pasta e à ausência de finos nas misturas de concretos permeáveis.

Contudo, a verificação do abatimento por esse método resulta, na maioria dos casos, em avaliações qualitativas, baseadas na coesão da mistura, manutenção da estrutura porosa e facilidade na moldagem. Nesse contexto, alguns estudos verificaram essa propriedade pelo ensaio de VeBe cujo método é utilizado em concretos com baixas relações água/cimento. Pesquisas realizadas por Bauer (2020) e Tavares e Kazmierczak (2016) verificam a trabalhabilidade por meio do método de VeBe e indicaram que esse método pode complementar o ensaio de abatimento convencional, permitindo estabelecer avaliações quantitativas.

Entre as propriedades físicas, os ensaios mais realizados para verificar as propriedades dos concretos permeáveis são: índice de vazios, absorção por capilaridade e permeabilidade à carga constante e variável. O índice de vazios é comumente determinado pelo método de variação de volume, calculado pela relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos (Monteiro, 2010). Martins Filho *et al.* (2020) conseguiram correlacionar resistência mecânica e volume de vazios total pelo ensaio do ultrassom a partir da velocidade de pulsos ultrassônicos

(VPU) e evidenciaram que quanto maior o índice de vazios, menor a resistência à compressão de uma amostra de concreto permeável. Nesse contexto, observa-se uma tendência crescente de utilização de técnicas avançadas de caracterização física e interna dos concretos permeáveis. Nessa pesquisa foi utilizada a microtomografia computadorizada (microCT) e análise digital de imagens, as quais permitem avaliar não apenas a quantidade de vazios, mas também sua distribuição, conectividade e geometria interna. Essas abordagens tornam possível uma compreensão mais detalhada da relação entre estrutura porosa, desempenho hidráulico e comportamento mecânico dos concretos permeáveis.

Outros ensaios físicos aplicados nos concretos permeáveis são os de absorção por capilaridade e os de permeabilidade pelo método descrito na ACI 522R–10 (2010), sendo realizados testes de infiltração de água para obtenção do coeficiente de permeabilidade do material. Estudos como os de Zhong *et al.* (2018) e Adresi *et al.* (2023) relatam por meio de uma revisão de literatura que esses procedimentos são os mais usuais para verificação das propriedades físicas das misturas de concretos permeáveis.

As propriedades mecânicas realizadas em estudos de concretos permeáveis são geralmente avaliadas por meio dos ensaios de resistência à compressão e resistência à flexão; a maioria dos estudos, como os desenvolvidos por Lori *et al.* (2019); El-Hassan *et al.* (2019); Debnath e Sarkar (2020) e Bittencourt *et al.* (2021), realizaram os mesmos procedimentos feitos em concretos convencionais. No entanto, observa-se que as características físicas do concreto permeável podem gerar pontos de fragilidade, ocasionando falta de estabilidade dimensional nos corpos de prova cilíndricos durante o procedimento de ensaio. Quanto a isso, não foram encontradas pesquisas que abordem a influência das dimensões de corpos de prova para concretos permeáveis nas propriedades mecânicas. Ademais, as amostras das pesquisas são feitas de forma cilíndrica e, em alguns casos, em forma cúbica. Além disso, devido à utilização do concreto permeável em pavimentos, são realizadas diferentes pesquisas, como os ensaios de perda de massa por abrasão e tração por compressão diametral (Adresi *et al.*, 2023; Hua *et al.*, 2021).

Em outro aspecto, sabe-se que a utilização do concreto permeável em pavimentos implica a exposição direta do material ao meio urbano. Nesse contexto, o concreto permeável fica sujeito à ação de mecanismos de degradação, como ciclos de gelo-degelo, molhagem-secagem, abrasão, colmatção e carbonatação, os quais podem comprometer parâmetros relacionados à durabilidade. Diante disso, diversas pesquisas buscam compreender a durabilidade dos concretos permeáveis, a exemplo de Merino-Lechuga *et al.* (2024).

Neste trabalho foi realizada a análise da durabilidade do concreto permeável frente à carbonatação. A carbonatação em concretos convencionais ocorre de maneira progressiva, formando uma frente carbonatada que avança da superfície para o interior do material, sendo fortemente influenciada pela estrutura porosa, teor de umidade, concentração de CO₂ e composição da matriz cimentícia.

O processo de carbonatação acontece devido à penetração do dióxido de carbono (CO₂) na estrutura porosa do material cimentício e sua reação com compostos alcalinos presentes na matriz, especialmente o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂). Inicialmente, o CO₂ difunde-se através dos poros não saturados do concreto e, na presença de água, reage com os hidróxidos alcalinos dissolvidos na solução intersticial. Em seguida, os carbonatos formados reagem com o Ca(OH)₂ disponível, promovendo a formação de carbonato de cálcio (CaCO₃), principalmente na forma de calcita estável. Além do hidróxido de cálcio, compostos hidratados do cimento, como silicatos e aluminatos de cálcio, também podem ser parcialmente carbonatados ao longo do processo (Medvedev e Pustovgar, 2023; Malheiro, 2018). A Equação 1 apresenta a reação química principal do processo de carbonatação.



Em concretos permeáveis, a elevada conectividade dos poros pode favorecer a difusão do CO₂, enquanto a precipitação de CaCO₃ tende a promover alterações microestruturais, como densificação localizada da matriz e redução parcial da porosidade. Além das alterações físicas, a carbonatação reduz a alcalinidade da solução intersticial devido ao consumo de Ca(OH)₂, provocando diminuição do pH do material (Malheiro, 2018).

No que se refere à avaliação da durabilidade frente à carbonatação, a elevada permeabilidade do concreto permeável favorece a rápida difusão de dióxido de carbono no interior da matriz, resultando em frentes de carbonatação significativamente mais rápidas quando comparadas às de concretos convencionais (Merino-Lechuga *et al.*, 2024). Nessa conjuntura, a análise da carbonatação em concretos permeáveis pode se dar no entendimento da evolução ao longo do tempo, visto que esse processo tende a refinar a matriz devido à carbonatação, podendo aumentar a resistência mecânica além de ser favorável ao mecanismo de captura de carbono (Zhong *et al.*, 2024; Ba *et al.*, 2023).

Apesar do avanço das pesquisas envolvendo concretos permeáveis, observa-se que ainda não há um consenso normativo consolidado quanto aos métodos mais adequados para a

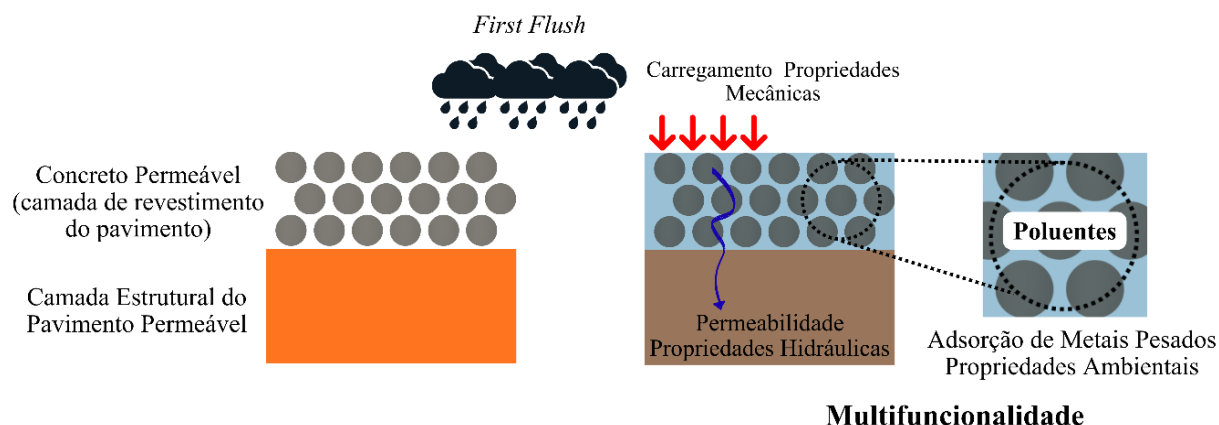
avaliação de determinadas propriedades desse material. Em muitos casos, os ensaios empregados são adaptações de procedimentos originalmente desenvolvidos para concretos convencionais. Além disso, o interesse em verificar as propriedades dos concretos permeáveis de contribuições ambientais ainda é uma lacuna do tema; esses aspectos estão abordados no próximo tópico.

2.4 A multifuncionalidade dos concretos permeáveis: Uma nova abordagem

Diante dos desafios globais relacionados à escassez de água, há um interesse considerável no reuso das águas residuais e pluviométricas. No entanto, em muitos casos, o efluente descarregado não atende aos padrões necessários para reutilização. Dessa forma, torna-se necessário melhorar a qualidade desse efluente para possibilitar seu reaproveitamento em atividades industriais e agrícolas. Para isso, o efluente deve passar por métodos de pré-tratamento, geralmente envolvendo processos simples e econômicos, que utilizam mecanismos físicos como peneiramento, flotação, decantação e filtração para remover contaminantes (Abedi-Koupai *et al.*, 2015).

Nesse contexto, a estrutura macroporosa com vazios interconectados dos concretos permeáveis favorece o contato entre a matriz de pasta cimentícia e a água percolante, criando condições propícias para a retenção física e química de contaminantes presentes no escoamento pluvial, que, a depender do coeficiente de permeabilidade e do índice pluviométrico, podem saturar esses vazios. Assim, o concreto permeável passa a ser compreendido como um material multifuncional, capaz de desempenhar simultaneamente funções estruturais, hidráulicas e ambientais. Além disso, essa estrutura pode mitigar a formação de ilhas de calor, conforme demonstrado nas pesquisas realizadas por Ranieri *et al.* (2022) e Wang *et al.* (2018). A Figura 2.1 apresenta um esquema que relaciona os diferentes aspectos desta multifuncionalidade.

Figura 2.1 – Esquema da funcionalidade do concreto permeável em sistemas de drenagem urbana sustentável



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Esta abordagem multifuncional do concreto permeável é recente e ainda representa uma lacuna científica. Nesta conjuntura, são poucos os estudos que buscam evidenciar os benefícios que o concreto permeável pode oferecer ao ambiente, atuando como um filtro para reter poluentes presentes nas águas residuais (Delnavaz *et al.*, 2024). Dessa forma, são demandadas investigações que considerem não apenas suas propriedades mecânicas e hidráulicas, mas também sua capacidade de interação com contaminantes presentes nas águas pluviais (Adab.; Abbasi, 2024; Ahmadi *et al.*, 2023; Krishnan *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2025; Riekert *et al.*, 2025).

Delnavaz *et al.* (2024) realizaram um estudo na Suíça focado na substituição parcial do cimento Portland por cinzas volantes e escória em proporções de 10% (PCF10), 20% (PCF20), 30% (PCF30) e 40% (PCF40), visando avaliar as capacidades filtrantes dessas misturas de concretos permeáveis para o ambiente. Constatou-se que as amostras PCF10 e PCF30 apresentaram os melhores resultados: PCF10 foi capaz de remover 93,94% da Demanda Biológica de Oxigênio (BOD) e 91,02% de ferro, enquanto PCF30 removeu 62% de Sólidos Suspensos Totais (TSS) e 74,83% de Demanda Química de Oxigênio (COD). Esses resultados indicam o potencial do concreto permeável como material filtrante aplicado ao tratamento preliminar de águas pluviais urbanas, possibilitando seu reaproveitamento, como na irrigação. Além disso, a retenção de sólidos e contaminantes contribui para que a água infiltrada alcance os lençóis freáticos com menor carga poluente, favorecendo a preservação da qualidade hídrica subterrânea.

Outra abordagem acerca dos aspectos ambientais foi realizada no estudo de Ranieri *et al.* (2022), na Itália, no qual se concentrou na eficácia de seis diferentes tipos de pavimentos na

mitigação da Ilha de Calor Urbano, incluindo pavimento verde, blocos de concreto porosos cinza, pavimento de concreto permeável claro, asfalto convencional, pavimento intertravado e pavimento de concreto. Eles utilizaram simulações tridimensionais não-hidrostáticas para comparar as propriedades estruturais e os custos de construção e manutenção. Os pavimentos verdes, blocos de concreto porosos cinza e pavimentos de concreto permeáveis claros provaram ser extremamente eficazes na redução da temperatura do ar, com reduções de 2,8 °C, 2,1 °C e 1,9 °C, respectivamente. No entanto, esses tipos de pavimentos com concreto permeável também apresentaram os maiores custos de manutenção devido as limpezas periódicas para não causar entupimento dos vazios, essas limpezas podem ser por via úmida ou seca.

Nesse contexto, a pesquisa de Wang *et al.* (2018) na China examinou a capacidade de evaporação dos pavimentos permeáveis e como isso pode contribuir para o resfriamento e, consequentemente, mitigar o fenômeno da ilha de calor. Foi observado que os concretos permeáveis facilitaram o resfriamento da superfície em aproximadamente um dia, com uma redução de 5 °C na temperatura da superfície quando comparados ao concreto convencional.

A multifuncionalidade do concreto permeável pode ser melhorada com a introdução de novos materiais. Na perspectiva sustentável, esses materiais podem ser resíduos, a exemplo do resíduo de caulim, que já se mostrou ser um material eficiente na adsorção de óleos (Patrício, 2016). Os próximos tópicos apresentam uma contextualização acerca do resíduo de caulim e de como ele pode potencializar as propriedades multifuncionais dos concretos permeáveis.

2.5 O resíduo de caulim nas frações finas e grossas

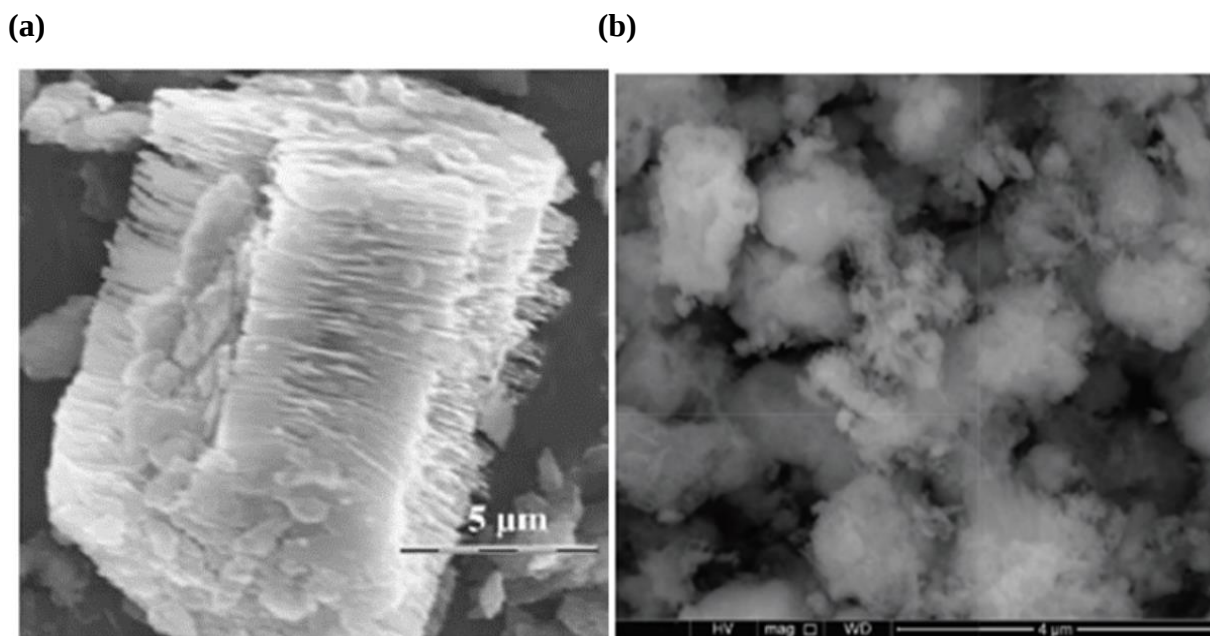
Para a adequada compreensão das características e do potencial de reaproveitamento dos resíduos gerados no processo de beneficiamento do caulim nas frações finas (RCF) e grossas (RCG), torna-se necessário o entendimento prévio do próprio caulim, descrito no próximo tópico.

2.5.1 O caulim: principais características, reservas e obtenção do minério

O caulim é uma rocha de cor branca e predominantemente com baixos teores de ferro, cujo uso é destinado à fabricação de papéis comuns e revestidos, cerâmicas e refratários (Brasil, 2022). Trata-se de uma rocha que possui como principal argilomineral a caulinita, cuja fórmula molecular é $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$, a qual é composta por cerca de 46% de SiO_2 (sílica), 39% de Al_2O_3 (alumina) e 14% de H_2O (Azerêdo, 2012).

A caulinita possui propriedades hidrotermais, dando a ela propriedades absorventes. Esse aspecto garante a esse material a propriedade de reter água. Em sua forma natural possui uma estrutura em dupla camada (octaédrica e tetraédrica), essa morfologia lamelar favorece o empilhamento de partículas e a formação de agregados compactos (Figura 2.2a). A morfologia superficial do caulim natural, não submetido a processos de beneficiamento, apresenta tipicamente partículas de geometria irregular, com bordas rugosas e elevado grau de aglomeração, resultando em uma superfície heterogênea e porosa (Figura 2.2b) (Azerêdo, 2012; Ayalew e Demir, 2023).

Figura 2.2 – a) Imagem microscópica da caulinita (Konan *et al.* 2009); b) Imagem microscópica do caulim natural, não submetido a processos de beneficiamento



Fonte: Ayalew e Demir (2023).

Segundo Ayalew e Demir (2023), a porosidade superficial presente no caulim não se distribui de maneira contínua, com valores próximos a 0,25 µm, sendo comum a presença de partículas de maior dimensão formadas pela sobreposição de múltiplas lamelas, frequentemente com arranjos aproximadamente hexagonais e estrutura plaquetária espessada. Esse comportamento morfológico é recorrente em caulins naturais e reflete tanto a estrutura cristalina da caulinita quanto a presença de impurezas minerais associadas. As análises morfológicas apontam que o caulim possui caráter adsorativo (Ayalew e Demir, 2023).

De acordo com Lima (2010), o caulim pode ser classificado, quanto à sua origem, em caulim residual e caulim sedimentar. O caulim residual é formado *in situ*, a partir do intemperismo de rochas feldspáticas, sendo composto predominantemente por quartzo,

enquanto o caulim sedimentar resulta de processos de transporte e deposição, apresentando maior teor de mica e quartzo, além de pequenas frações de dióxido de titânio (entre 1 e 2%) e presença de matéria orgânica. Além disso, quando submetido à calcinação em temperaturas da ordem de 700 a 800 °C, o principal argilomineral do caulim, a caulinita, sofre um processo de desidroxilação e perde sua estrutura cristalina, originando o metacaulim, um material amorfo com elevada reatividade pozolânica (Monteiro, 2025).

Segundo os dados do Plano de Mineração 2050, o Brasil está entre os 11 maiores produtores de caulim do mundo, classificando as reservas do país como abundantes (Brasil, 2022). A Tabela 2.2 apresenta o *ranking* dos maiores detentores mundiais de reservas de caulim, no ano de 2021, uma vez que os levantamentos mais recentes não disponibilizam esse ranqueamento de forma detalhada.

Tabela 2.2 – *Ranking* mundial dos principais detentores das reservas de caulim, no ano de 2021

País	Colocação	Reserva Medida
Estados Unidos	1	Abundantes
Índia	2	
China	3	
Turquia	4	
Irã	5	
Alemanha	6	
Mianmar	7	
Japão	8	
República Tcheca	9	
Espanha	10	
Brasil	11	

Fonte: Adaptado Brasil (2022).

No que se refere à América Latina, o IndexBox apresentou o Brasil como o responsável por cerca de 77% da produção, com volume estimado em 2024 de aproximadamente 1,4 milhões de toneladas (Mt) (IndexBox, 2024).

No contexto nacional, as maiores reservas de caulim estão nos estados do Amazonas (2669 Mt) e do Rio Grande do Norte (729 Mt). A Paraíba ocupa a 7ª colocação na extração do minério com uma reserva medida em 217,7 Mt (Brasil, 2022). A Tabela 2.3 apresenta os últimos dados (ano de 2022) referentes ao volume das reservas brasileiras de caulim, com a apresentação da Reserva Medida, da Reserva Indicada e da Reserva Inferida.

Tabela 2.3 – Reservas de caulim nos estados do Brasil

Estado	Colocação	Reserva Medida (Mt. minério)	Reserva Indicada (Mt. minério)	Reserva Inferida (Mt. minério)
Amazonas	1	2669	2186	1349
Piauí	2	754,3	337,9	448,3
Rio Grande do Norte	3	729	249,6	
Amapá	4	581	274,6	
Pará	5	335,8	283,8	147,6
Rio de Janeiro	6	224,4	28,8	
Paraíba	7	217,7	216,3	64,7
Santa Catarina	8	85,3	19,7	5,2
São Paulo	9	35,2	19,7	20,3
Espírito Santo	10	25		
Paraná	11	21,2	283,8	147,6
Goiás	12	20,7	10,7	43,7
Minas Gerais	15	15	9,0	1,4
Bahia	16	7,3	2,7	2,7
Maranhão	17	2,2	0,3	
Pernambuco	18	1,8		
Brasil		5.747,5	3.669,1	2.116,5

Fonte: Adaptado De Brasil (2022).

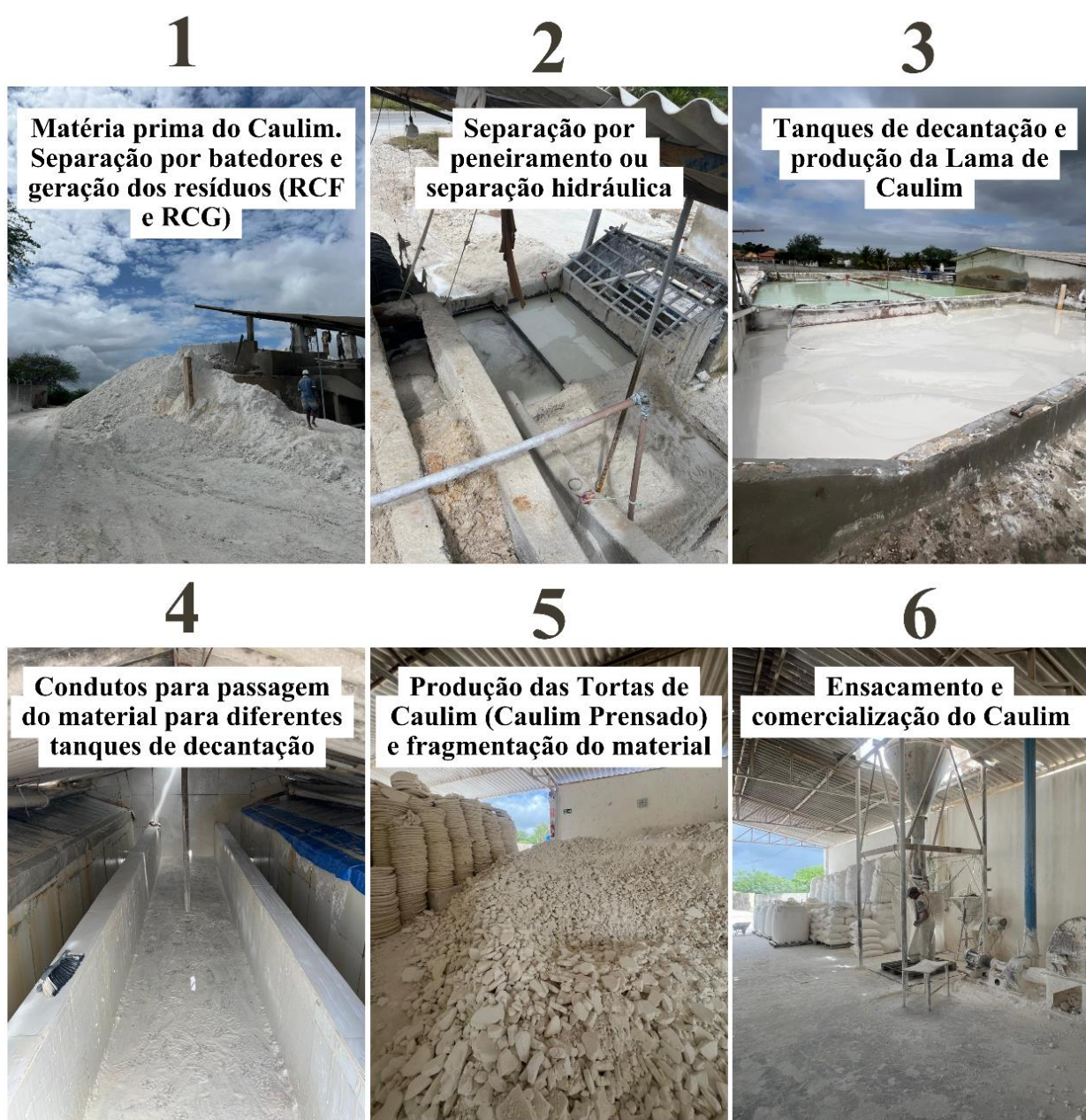
Após ser extraído o minério, o caulim passa por diferentes processos de beneficiamento, que podem ser classificados em úmidos, secos ou térmicos. Entre esses, o processamento úmido é o mais utilizado, principalmente quando o caulim é destinado à indústria de papel e ao uso como enchimento de materiais cimentícios (Longhi, 2016).

Segundo Azerêdo (2012), no Estado da Paraíba, o método mais usado pelas indústrias é o de beneficiamento por meio úmido, atualmente o método continua o mesmo, entretanto, mais mecanizado. Nesse método, o caulim é inicialmente desagregado em batedores, onde se adiciona água para remover minerais acessórios e separar a fração de caulim aglomerada. Nessa etapa, ocorrem a produção e o descarte dos resíduos de caulim nas frações finas (RCF) e grossas (RCG). Em seguida, o material é submetido ao peneiramento ou a separadores hidráulicos, garantindo a classificação adequada das partículas. Em sequência, o material passa por tanques de decantação, nos quais os flocos de caulim se decantam, sendo posteriormente bombeado para filtros-prensa que removem o excesso de água, originando a chamada torta de caulim, formando o material na forma prensada. Este material prensado pode ser seco ao ar ou em fornos de superfícies quentes, fato que ocorre com mais frequência durante períodos mais úmidos. Em seguida, o material é fragmentado, moído, ensacado e comercializado em frações de malha #325 e #200. Etapas adicionais, como clareamento, podem envolver separação

magnética de alta intensidade, lixiviação redutora, floculação seletiva e/ou flotação por espuma. Além do RCF e do RCG, popularmente conhecidos na região do Seridó na Paraíba por borra e birra, respectivamente, ao fim do processo, são gerados resíduos provenientes desses tratamentos, compostos por partículas de menor brancura; são conhecidos como lodo de caulim e geralmente são acumulados em grandes bacias artificiais (Longhi, 2016; Azerêdo, 2012).

A Figura 2.3 apresenta uma indústria de caulim, a qual foi visitada em seu processo de beneficiamento do minério, na cidade de Juazeirinho – PB.

Figura 2.3 – Processo de beneficiamento do caulim por via úmida



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O alto volume de caulim produzido gera grandes volumes de resíduos adequados para reaproveitamento, podendo contribuir para a economia circular, além de também trazer benefícios para o meio ambiente, visto que esse material não ficaria mais depositado de forma irregular nas proximidades tanto do meio urbano como nos arredores das indústrias. A Figura 2.4 apresenta os depósitos de resíduo de caulim em uma indústria de mineração na cidade de Juazeirinho – PB.

Figura 2.4 – Depósitos de resíduo de caulim no município de Juazeirinho – PB



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O resíduo de caulim nas frações finas (RCF) e grossas (RCG) é originado do processo de beneficiamento do caulim, sendo obtido em grandes volumes durante as etapas iniciais de tratamento do minério (Silveira, 2026). Não está catalogado o volume exato de resíduo de caulim produzido mundialmente ou no Brasil. Entretanto, uma indústria de mineração de caulim, no município de Juazeirinho, no estado da Paraíba, no Brasil, estima que diariamente é recebida cerca de 1 tonelada de matéria-prima, da qual 80% se torna resíduo. Além disso, existem indústrias que não são registradas nas entidades governamentais, sendo inestimável a quantidade exata de resíduo de caulim produzido na região.

Segundo Andrade (2019), esses resíduos são classificados como rejeitos por não apresentarem, a princípio, aplicação industrial consolidada ou valor comercial agregado, o que

resulta, na maioria dos casos, em sua disposição em áreas de estocagem ou bacias de rejeito. Esse cenário configura um relevante passivo ambiental, especialmente em regiões com intensa atividade minerária, em virtude da ocupação de áreas extensas, da degradação paisagística e da possibilidade de impactos sobre o solo e os corpos hídricos adjacentes (Longhi, 2016; Azerêdo, 2012; Lima, 2010).

Dessa forma, reaproveitar esse resíduo se alinha com alguns dos ODS, tais como ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e ODS 12 (Consumo e Produções Responsáveis) (United Nations, 2015).

2.5.2 A reutilização dos resíduos de caulim em misturas cimentícias

As propriedades do caulim são estendidas ao seu resíduo (RCF e RCG). A microestrutura confere ao material características físico-químicas que podem ser exploradas em aplicações alternativas, incluindo o reaproveitamento em matrizes cimentícias, como tratadas nas pesquisas de Chouksey *et al.* (2025); Arruda *et al.* (2022) e Rodrigues *et al.* (2021), que incorporaram RCF, RCG e lama de caulim em misturas de concretos e argamassas.

Nesse contexto, Chouksey *et al.* (2025) produziram um concreto ecologicamente correto, variando o teor de lama de caulim e metacaulim de 0 a 15%, para avaliar o efeito combinado na trabalhabilidade, resistência e durabilidade. Após os ensaios mecânicos, foi constatado que a mistura com 10% de lama de caulim e 10% de metacaulim apresentou o melhor desempenho, atingindo um aumento de 25,8% na resistência à compressão aos 90 dias, em comparação com a mistura de referência. As resistências à tração e à flexão melhoraram em 13,2%.

Arruda *et al.* (2022) tiveram como foco a obtenção de um material pozolânico a partir da calcinação e moagem de misturas de lama vermelha e resíduo de caulim. A utilização desse material nas formulações resultou em ganhos de resistência mecânica e em maior estabilidade cromática das argamassas coloridas, quando comparadas àquelas produzidas com pigmentos de natureza inerte.

Rodrigues *et al.* (2021) desenvolveram argamassas contendo resíduos de caulim naturais e calcinados em temperatura igual a 800 °C; as substituições foram realizadas em relação ao cimento com porcentagens variando de 0 a 30%. Foi constatado que a adição de RC às composições de argamassa reduz a resistência mecânica à compressão; entretanto, as argamassas com substituição de 10% e 20% apresentaram valores de resistência dentro do limite mínimo estabelecido por norma.

Adicionalmente, Azerêdo (2012) realizou estudos em pastas e argamassas à base de cal que tinham em suas composições resíduo de caulim natural e calcinado. Foi concluído que as duas formas de resíduo podem ser utilizadas nas misturas, obtendo-se resultados de resistência à compressão de 12,20 MPa aos 90 dias para argamassas que obtiveram cura úmida e de 6,60 MPa para aquelas de cura ao ar.

Assim, pode-se concluir que resíduos de caulim apresentam elevado potencial para esse tipo de abordagem, em razão de sua estabilidade química, disponibilidade em grandes quantidades e compatibilidade com materiais cimentícios, possibilitando a redução da extração de agregados naturais e a mitigação dos impactos ambientais associados à mineração. Nesse contexto, a incorporação dos resíduos de caulim insere-se de forma direta nos princípios da sustentabilidade e da economia circular, a qual propõe a superação do modelo linear tradicional de produção baseado na extração, fabricação, consumo e descarte em favor de um sistema regenerativo, no qual resíduos possam ser reinseridos como insumos em novos ciclos produtivos (Kirchherr; Reike; Hekkert, 2017).

Ainda acerca de pesquisas que utilizaram esse resíduo, pode ser citada novamente a de Patrício (2016), que identificou que o resíduo de caulim apresenta propriedades adsorventes, especialmente em relação a óleos, o que fundamenta a hipótese desta pesquisa de utilizá-lo em misturas de concretos permeáveis como material auxiliar na adsorção de contaminantes presentes nas águas pluviais, incluindo íons metálicos. Essa característica amplia o papel do resíduo de caulim para além de um simples material de substituição, conferindo-lhe uma função ambiental ativa quando incorporado a concretos permeáveis.

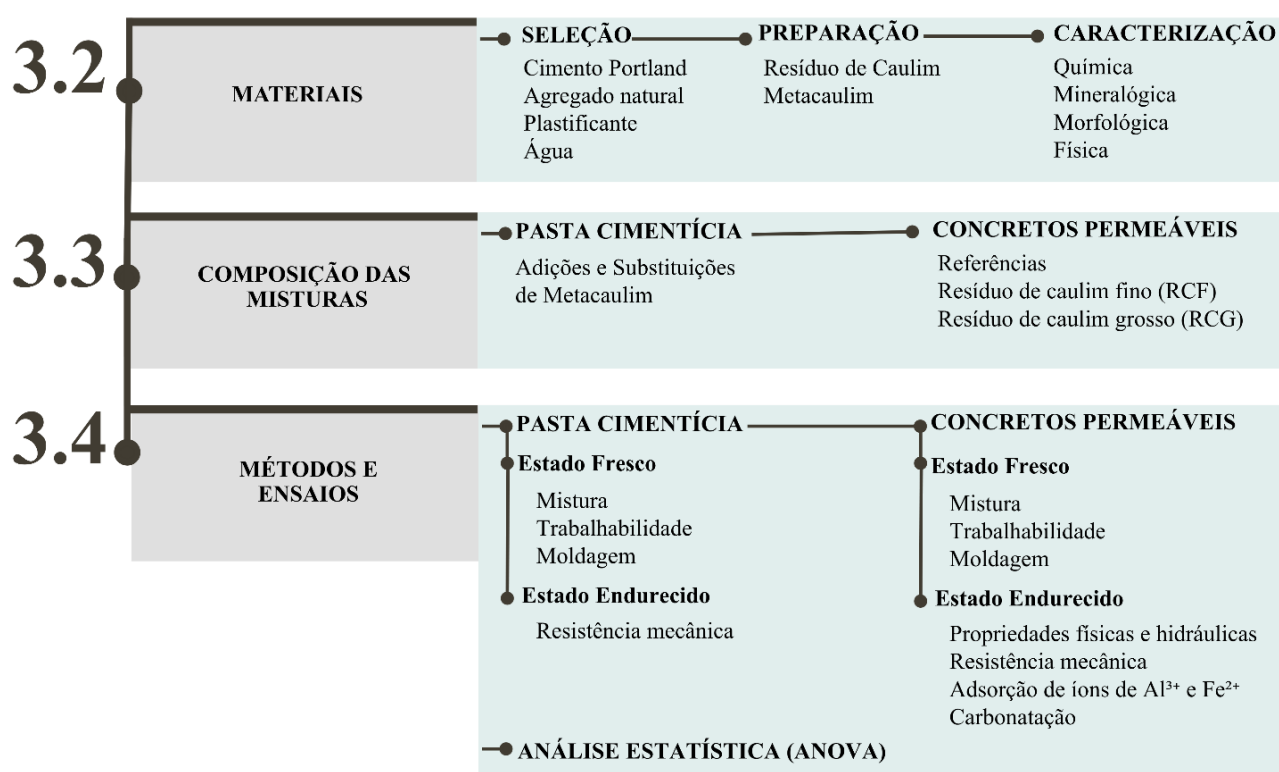
Embora diversos estudos utilizem a fração fina do resíduo de caulim em materiais cimentícios, ainda são escassas as pesquisas que investigam o aproveitamento simultâneo das frações fina e grossa em concretos permeáveis. Além disso, verifica-se uma ausência de abordagens envolvendo, simultaneamente, resíduos de caulim, metacaulim e avaliação multifuncional do material quanto ao desempenho mecânico, hidráulico e adsortivo.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Delineamento geral da pesquisa

O procedimento metodológico foi estruturado em três fases principais, conforme apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxograma geral das etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A primeira fase compreendeu a seleção, preparação e caracterização dos materiais, considerando os aspectos químicos, mineralógicos, morfológicos e físicos. A segunda fase envolveu a composição das misturas das pastas cimentícias e dos concretos permeáveis.

A terceira fase incluiu a definição dos métodos de ensaio para a avaliação das propriedades nos estados fresco e endurecido das pastas, com adições e substituições de metacaulim (MK), e dos concretos permeáveis, sem e com as adições do resíduo de caulim fino (RCF) e grosso (RCG), bem como a substituição parcial do cimento por metacaulim (MK). Nesta etapa, também foi realizada a avaliação dos concretos permeáveis quanto à adsorção de íons metálicos de alumínio (Al^{3+}) e de ferro (Fe^{2+}) presentes em águas contaminadas simuladas em laboratório, bem como a análise da durabilidade frente ao processo de carbonatação.

Por fim, foi realizada a análise estatística dos resultados físicos, hidráulicos e mecânicos por meio da ANOVA, permitindo a verificação da significância das diferenças observadas entre as misturas estudadas.

Esse delineamento permitiu avaliar, de forma integrada, o desempenho físico, hidráulico, mecânico e o potencial adsorativo dos concretos permeáveis contendo MK, RCF e RCG.

3.2 Materiais

A Tabela 3.1 apresenta os materiais utilizados na composição das misturas, com suas respectivas descrições e origens.

Tabela 3.1 – Materiais utilizados nas misturas e suas respectivas descrições e origens

Material	Imagem	Descrição e origem
Plastificante		FK 2600, obtido em uma concreteira do município de João Pessoa, estado da Paraíba (PB), Nordeste, Brasil.
Água deionizada		Água destilada obtida no laboratório de Reologia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).
Cimento Portland		Cimento Portland V ARI (Alta Resistência Inicial), da marca Nacional.
Agregado natural		Agregado granítico obtido em concreteiras do Litoral e do Sertão da PB.
Resíduo de caulim grosso (RCG)		Resíduos de origem caulinítica obtidos do beneficiamento do caulim, em uma indústria no estado da PB.
Resíduo de caulim fino (RCF)		
Metacaulim		Pozolana obtida por meio da calcinação do caulim realizada no Laboratório de Estruturas e Materiais (LABEME/UFPB)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para garantir a trabalhabilidade e as propriedades no estado fresco, empregaram-se o aditivo plastificante FK 2600 (densidade: $\sim 1,09$ kg/L à temperatura de $+25$ °C) e água deionizada, fornecida pelo Laboratório de Reologia da Universidade Federal da Paraíba. Como aglomerante, utilizou-se o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018), equivalente ao cimento CEM I segundo a EN 197-1 (CEM, 2011) e ao Tipo III da C150 (ASTM, 2022). A utilização desse cimento justifica-se pelo seu maior

teor de clínquer e menor quantidade de adições minerais, permitindo uma avaliação das contribuições do metacaulim (MK) nas propriedades do material.

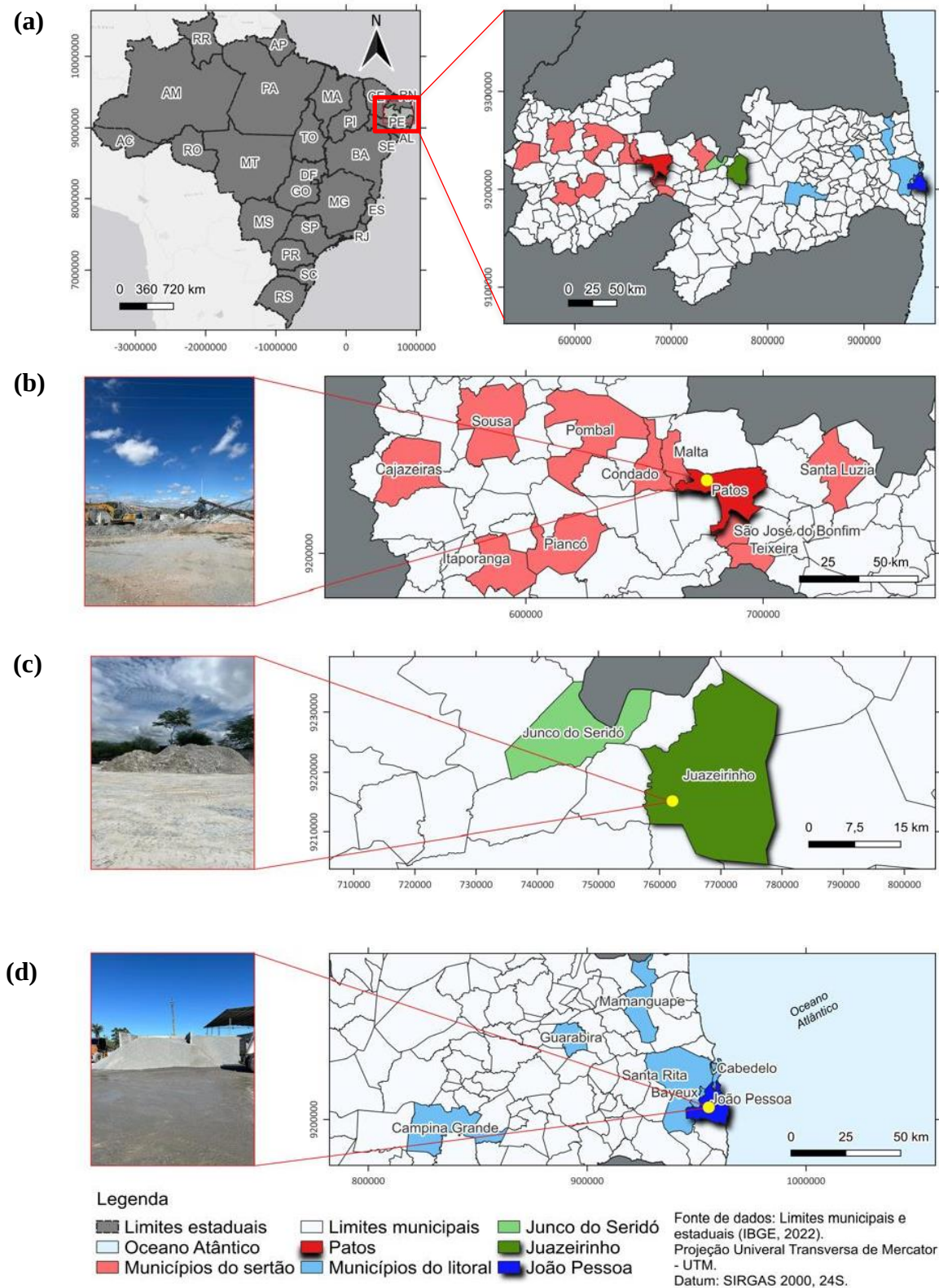
O agregado granítico natural foi obtido de duas regiões da Paraíba, Nordeste do Brasil: João Pessoa (Agregado Litoral), cuja área de suprimento se restringe à região do litoral e à Borborema, e Patos (Agregado Sertão), com suprimento destinado à região do Sertão. O objetivo foi analisar diferentes agregados graníticos empregados no estado da Paraíba antes da sua utilização nas misturas de concretos permeáveis e avaliar possíveis divergências quanto ao seu uso e às suas propriedades físicas.

O resíduo de caulim foi obtido nas frações finas (RCF) e grossas (RCG), provenientes de uma indústria de mineração e beneficiamento do caulim, localizada no município de Juazeirinho, cuja matéria-prima é explorada em Junco do Seridó, ambos situados no estado da Paraíba, região Nordeste do Brasil, a aproximadamente 220 km da capital, João Pessoa.

O caulim foi obtido no mesmo local de obtenção dos resíduos. Esse material foi submetido em laboratório a uma calcinação a 700 °C por duas horas, formando o metacaulim (MK). Na calcinação do caulim foi realizado o método descrito por Monteiro *et al.* (2025) visto que se trata da matéria-prima da mesma região. Além desse, Medeiros e Moraes (2020); Lima *et al.* (2013) e Oliveira (2004) realizaram a calcinação desse caulim e analisaram o metacaulim formado. Para calcinar o caulim foi utilizado forno mufla da marca Milley, modelo MLCA 150 L, série 2237, com capacidade volumétrica de 150 L, potência de 15 kW, alimentação elétrica trifásica de 380 V com neutro, corrente nominal de 22 A e temperatura máxima de operação de 1300 °C.

A Figura 3.2 complementa as informações apresentadas na Tabela 3.1, indicando os locais das indústrias e coleta dos agregados graníticos, com suas respectivas áreas de influência de abastecimento (municípios), bem como a origem do resíduo de caulim em ambas as frações e do caulim.

Figura 3.2 – Locais de obtenção dos materiais: (a) mapa do Brasil; (b) localização dos lugares de onde vem o agregado para uso em concretos e argamassas no interior da Paraíba; (c) matéria-prima da argila caulinita; (d) locais onde é obtido o agregado usado na região litorânea do estado da Paraíba



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.2.1 Caracterização dos materiais

Foram realizadas as caracterizações químicas, mineralógicas e físicas do CP V-ARI, do MK e dos resíduos de caulim (RCF e RCG) e física dos agregados graúdos naturais. Adicionalmente, foi realizada a análise morfológica do resíduo de caulim na forma de pequenos grãos, visando compreender suas propriedades intrínsecas e como isso poderia influenciar na capacidade de adsorção de íons metálicos. A Tabela 3.2 sintetiza os ensaios de caracterização realizados nos materiais.

Tabela 3.2 – Ensaios e normas para caracterização dos materiais

Material	Ensaio de caracterização	Normas
Cimento Portland Metacaulim	Fluorescência de raios X (FRX)	-
	Difratometria de raios X (DRX)	
	Granulometria por Difração de Raios Laser	
	Massa específica real	NBR 11582 (ABNT, 2016)
	Massa específica aparente (unitária)	-
Resíduo de caulim fino (RCF)	FRX e DRX	-
	Massa específica real	NBR 16916 (ABNT, 2021)
	Massa específica aparente (unitária)	NBR 16972 (ABNT, 2021)
	Granulometria	NBR 7211 (ABNT, 2022)
	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	-
	FRX e DRX	-
Resíduo de caulim grosso (RCG) Agregado natural	Granulometria	NBR 7211 (ABNT, 2022)
	Massa específica real	NBR 16917 (ABNT, 2021)
	Massa específica aparente (unitária)	NBR 16917 (ABNT, 2021)
	Índice de forma	ME 425 (DNIT, 2020)
	Abrasão a Los Angeles	ME 451 (DNIT, 2024)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A composição química dos materiais foi determinada por meio da técnica de fluorescência de raios X (FRX), com os resultados expressos em teores de óxidos. As amostras foram obtidas após serem destorroadas e passadas na peneira de malha #200. As análises foram realizadas no Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais do Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Rio Grande do Norte (LT2M–IFRN), utilizando o equipamento

Shimadzu EDX-720. A metodologia consistiu de uma análise semiquantitativa realizada em pó em atmosfera a vácuo, sendo realizadas duas leituras: uma no intervalo de Na–Sc e outra no intervalo de Ti–U. Os resultados das composições químicas obtidas por Fluorescência de Raios X (FRX) são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Composição química do CP V ARI, do MK e do RC

Composição Química (%)	Materiais		
	CP V ARI	MK	Resíduos de caulim (RCF e RCG)
CaO	71,68	0,475	0,474
SiO ₂	11,23	54,63	52,74
Al ₂ O ₃	2,16	38,23	37,02
K ₂ O	1,76	1,98	1,59
SO ₃	5,35	1,74	2,10
P ₂ O ₅	2,053	1,01	1,07
Fe ₂ O ₃	3,40	0,494	0,620
BaO	–	–	0,212
TiO ₂	0,296	–	–
Perda ao fogo	2,07	1,44	4,17

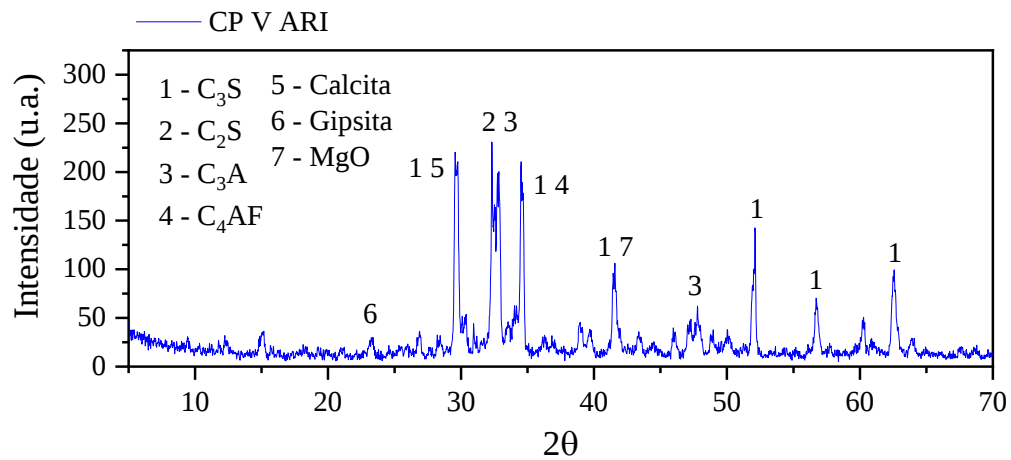
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O cimento CP V ARI apresenta predominância de óxido de cálcio (CaO), refletindo seu papel como aglomerante hidráulico (Mehta; Monteiro, 2014). A análise por FRX indica que a composição química do MK é praticamente equivalente à do RCF e do RCG, o que se explica pelo fato de ambos derivarem da mesma matéria-prima. Além disso, a baixa perda ao fogo do MK evidencia a eficiência e o controle do processo de calcinação, enquanto a maior perda ao fogo observada no RCF e no RCG indica a presença de matéria orgânica residual e/ou água estrutural associada aos argilominerais (Huang *et al.*, 2026).

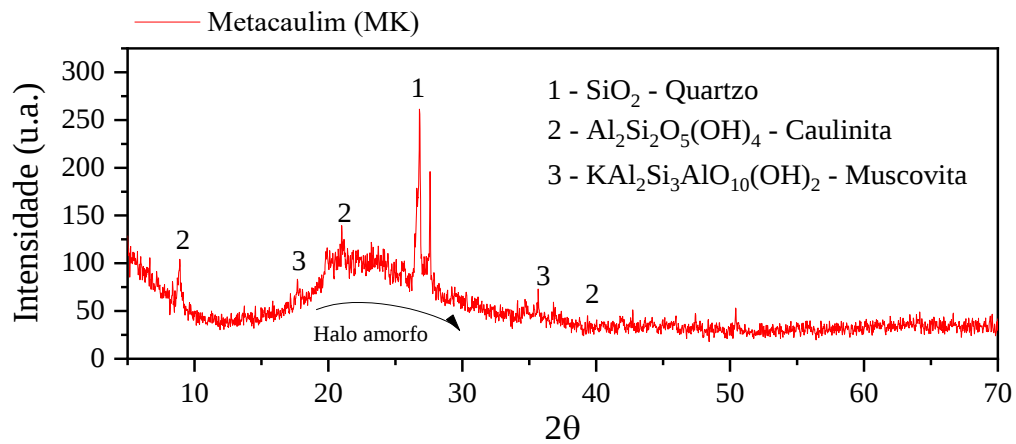
Para a análise por difração de raios X (DRX), as amostras foram destorroadas e passadas na peneira de malha #200. Os ensaios foram realizados em um difratômetro Siemens D5000, operando com radiação CuK α , tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, velocidade de varredura de 0,02°/s e faixa angular de 5° a 80°. A identificação das fases cristalinas foi efetuada com o auxílio do software X'Pert HighScore Plus, sendo as análises conduzidas no Núcleo de Estudos e Pesquisa em Materiais (Nepem–UFPB). Os resultados da difratometria de raios X (DRX) realizada no CP V ARI, no MK e no resíduo de caulim são apresentados na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Difrátogramas de raios X (DRX): (a) CP V ARI; (b) metacaulim e (c) resíduo de caulim

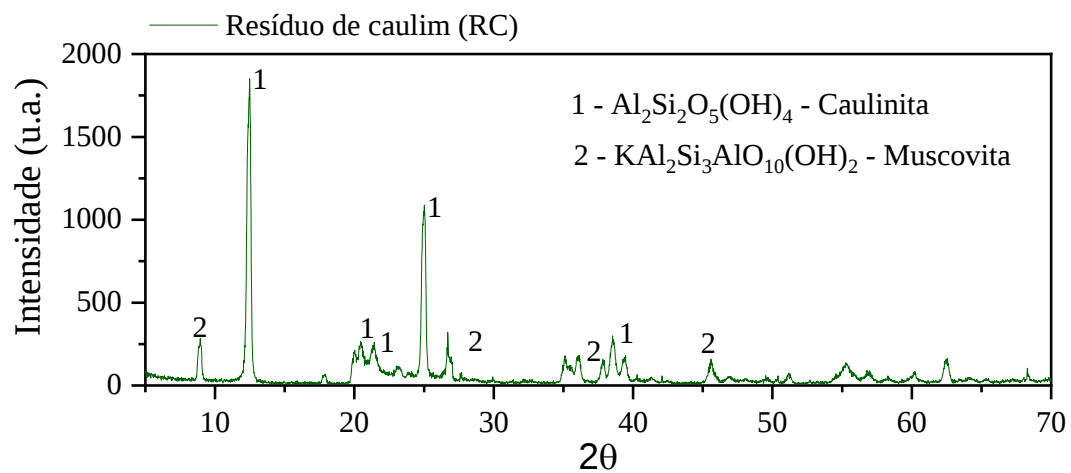
(a)



(b)



(c)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O difratograma do cimento CP V ARI revela o conjunto de fases cristalinas típicas de um cimento Portland de alta resistência inicial, com picos bem definidos de alita (C_3S), belita (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferrita (C_4AF). Também são identificadas fases secundárias, como calcita ($CaCO_3$) e gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) e a presença de óxido de magnésio (MgO). Essas fases são comumente encontradas na caracterização mineralógica de cimentos Portland por difração de raios X, conforme apresentado por Stutzman, Feng e Bullard (2016).

O difratograma do metacaulim evidencia padrões característicos de materiais predominantemente amorfos, com a presença de um halo difuso entre aproximadamente 20° e 25° (2θ), indicando a desorganização estrutural resultante do processo de calcinação da caulinita (Monteiro, 2025). Ainda são identificados picos residuais de quartzo (SiO_2) e traços das fases precursoras caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) e muscovita ($KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$). A presença desses remanescentes cristalinos sugere desidroxilação incompleta ou heterogeneidade na matéria-prima original, fenômeno frequentemente reportado na literatura para metacaulins comerciais (Geu *et al.*, 2026). Do ponto de vista funcional, a elevada fração amorfa do metacaulim favorece a atividade pozolânica (Weise, Ukrainczyk e Koenders, 2023).

O resíduo de caulim apresenta um perfil mineralógico predominantemente cristalino, distinto daquele observado para o metacaulim. Os picos mais intensos correspondem principalmente às fases caulinita e muscovita, minerais comumente encontrados em depósitos caulíníticos da região do Seridó. A predominância dessas fases indica a preservação da estrutura cristalina original do material (Campos e Bertolino, 2015; Alemida *et al.*, 2016), evidenciando que o resíduo não foi submetido ao processo de calcinação responsável pela transformação da caulinita em metacaulinita amorfa.

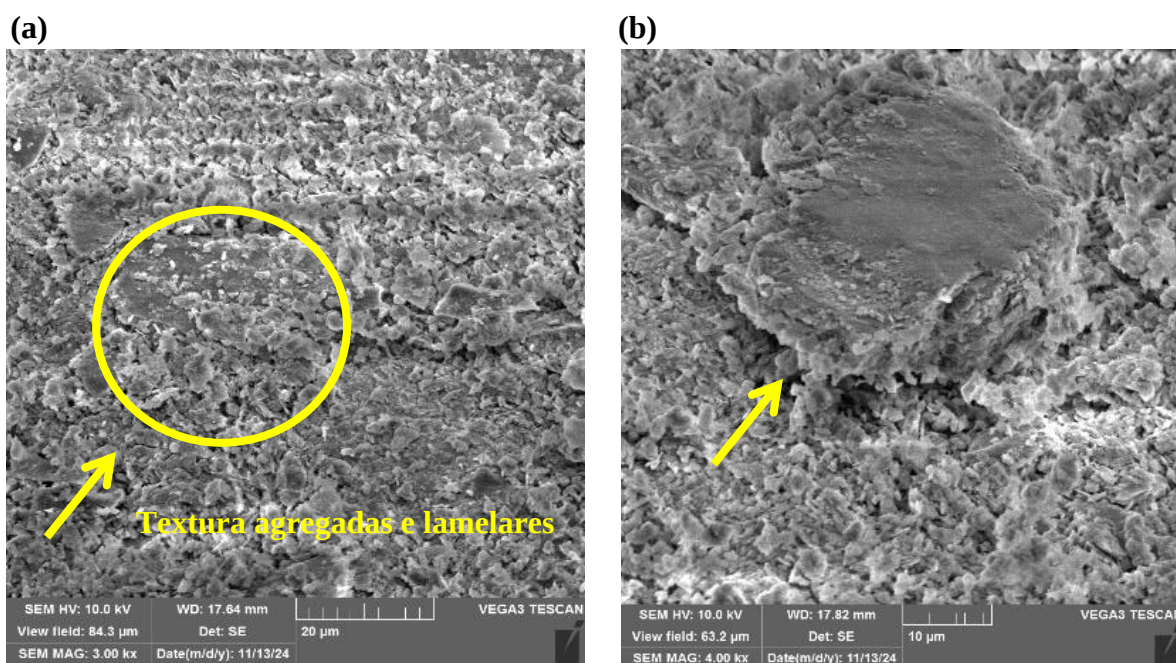
Ademais, embora o quartzo seja frequentemente relatado em resíduos de caulim, não foram observados picos suficientemente intensos para sua identificação nessa amostra. Após a calcinação, a desidroxilação da caulinita promove a formação da fase amorfa (metacaulim), reduzindo significativamente a intensidade dos picos da caulinita. Dessa forma, fases cristalinas remanescentes, como o quartzo, tornam-se relativamente mais evidentes no difratograma.

A análise morfológica do resíduo de caulim foi realizada por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando um equipamento Tescan VEGA, operando com tensão de aceleração de 15 kV, após a metalização das amostras com ouro. As imagens foram obtidas com ampliações de $3000\times$ e $4000\times$, permitindo a observação detalhada da morfologia, da textura superficial e da estrutura das partículas do resíduo de caulim. Essa análise possibilitou a avaliação de características como lamelaridade, irregularidade superficial e

potencial aumento da área específica, aspectos relevantes para a compreensão dos mecanismos de adsorção dos íons Al^{3+} e Fe^{2+} . O ensaio foi realizado no LT2M-IFRN.

As Figuras 3.4a e 3.4b permitem observar em detalhe a morfologia lamelar do resíduo de caulim e reforçam seu comportamento menos reativo quando comparado ao MK. Além disso, a predominância de fases com textura agregada e lamelares no resíduo de caulim é relevante do ponto de vista da adsorção de íons Al^{3+} e Fe^{2+} , uma vez que essas estruturas apresentam elevada área superficial específica e grupos funcionais capazes de promover mecanismos de troca iônica e interações eletrostáticas (Bhattacharyya e Gupta, 2008). Assim, embora o resíduo de caulim não contribua de forma significativa para reações pozolânicas, sua mineralogia e morfologia pode favorecer seu desempenho como material adsorvente, justificando sua aplicação na formulação dos concretos avaliados neste estudo, para além do caráter sustentável.

Figura 3.4 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do grão de resíduo de caulim: (a) ampliação de 3000 X e (b) ampliação de 4000 X



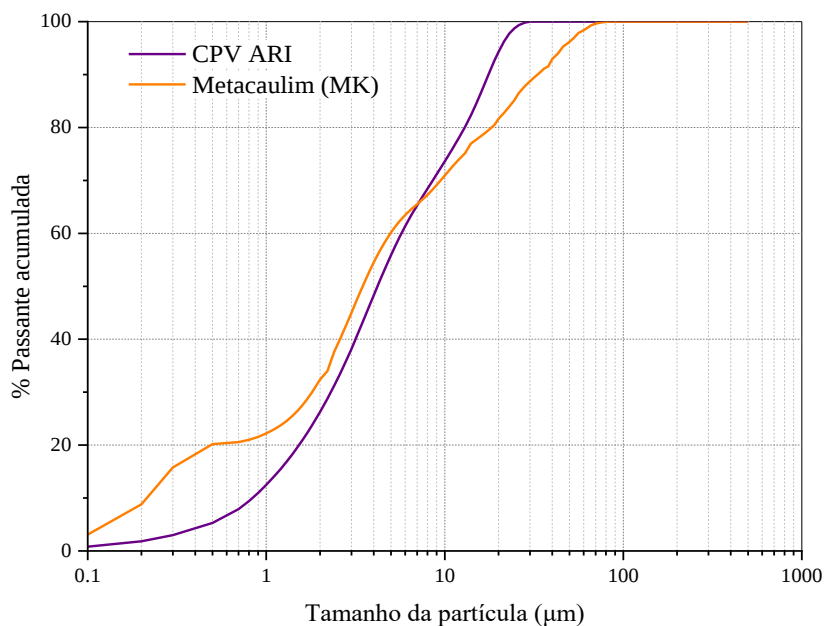
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A caracterização física dos materiais finos (CP V-ARI e MK) incluiu granulometria por difração de raios laser via seca, utilizando um granulômetro CILAS 1090, na faixa de tamanhos entre 0,04 μm e 500 μm , com sistema de alimentação, coleta e transporte do material operando por vibração (55 Hz, amplitude de 55%). Também foram realizados os ensaios de massa específica pelo voluminímetro de Le Chatelier, seguido pela NBR 11582 (ABNT, 2016) e de

massa específica aparente, conduzidos no Laboratório de Estruturas e Materiais da Universidade Federal da Paraíba (LABEME/UFPB).

O resultado de Granulometria por Difração de Raios Laser foi responsável pela caracterização física dos materiais finos (CP V ARI e MK). A Figura 3.5 apresenta as curvas granulométricas desses materiais.

Figura 3.5 – Curvas da Granulometria por Difração de Raios Laser do CP V ARI e MK



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A partir da Figura 3.5, percebe-se que o MK apresenta uma curva deslocada para a esquerda para menores tamanhos de partícula em relação ao CP V ARI, indicando maior fração de partículas finas, especialmente na faixa inferior a aproximadamente 5 μm. Esse comportamento pode ser característico de materiais submetidos aos processos de calcinação e moagem fina, resultando em elevada finura.

O CP V ARI, por sua vez, apresenta uma distribuição granulométrica ligeiramente mais grossa, com maior concentração de partículas na faixa intermediária de tamanhos, refletindo o processo industrial de moagem do clínquer associado à adição de reguladores de pega. Apesar disso, observa-se sobreposição parcial das curvas na faixa entre aproximadamente 5 e 20 μm, indicando semelhança na distribuição de tamanhos de partículas nessa faixa granulométrica entre os materiais.

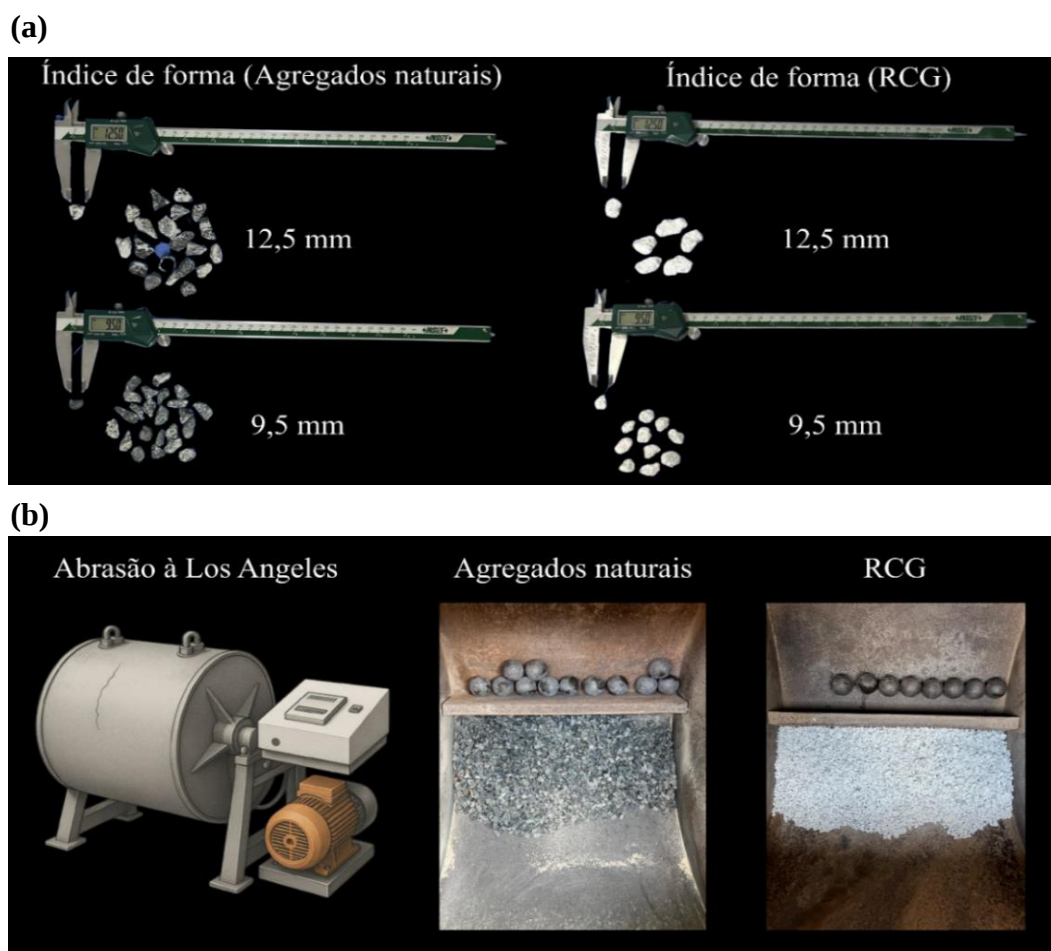
A maior finura do metacaulim em relação ao cimento é um aspecto relevante do ponto de vista físico, uma vez que partículas mais finas tendem a atuar como material de

preenchimento na matriz cimentícia, contribuindo para o empacotamento das partículas e para a densificação da fase pasta nas misturas de concreto permeável (Chen *et al.*, 2020).

A caracterização física dos materiais grossos incluiu os agregados naturais (Agregado Litoral e Agregado Sertão), bem como as frações RCF e RCG. Foram realizados ensaios de granulometria por peneiramento conforme a NBR 7211 (ABNT, 2022); massa específica real conforme a NBR 16916 (2021) e a NBR 16917 (2017); e massa específica aparente conforme a NBR 16972 (2021) e a NBR 16917 (ABNT, 2021). Os métodos de ensaio foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LABEME/UFPB).

Os agregados naturais e o RCG foram submetidos aos ensaios de índice de forma conforme a ME 425 (DNIT, 2020) e de abrasão à Los Angeles conforme a ME 451 (DNIT, 2024), visando à avaliação das características geométricas e da resistência ao desgaste. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais do Centro Universitário de João Pessoa (UNIPÊ), cujos procedimentos estão ilustrados na Figura 3.6.

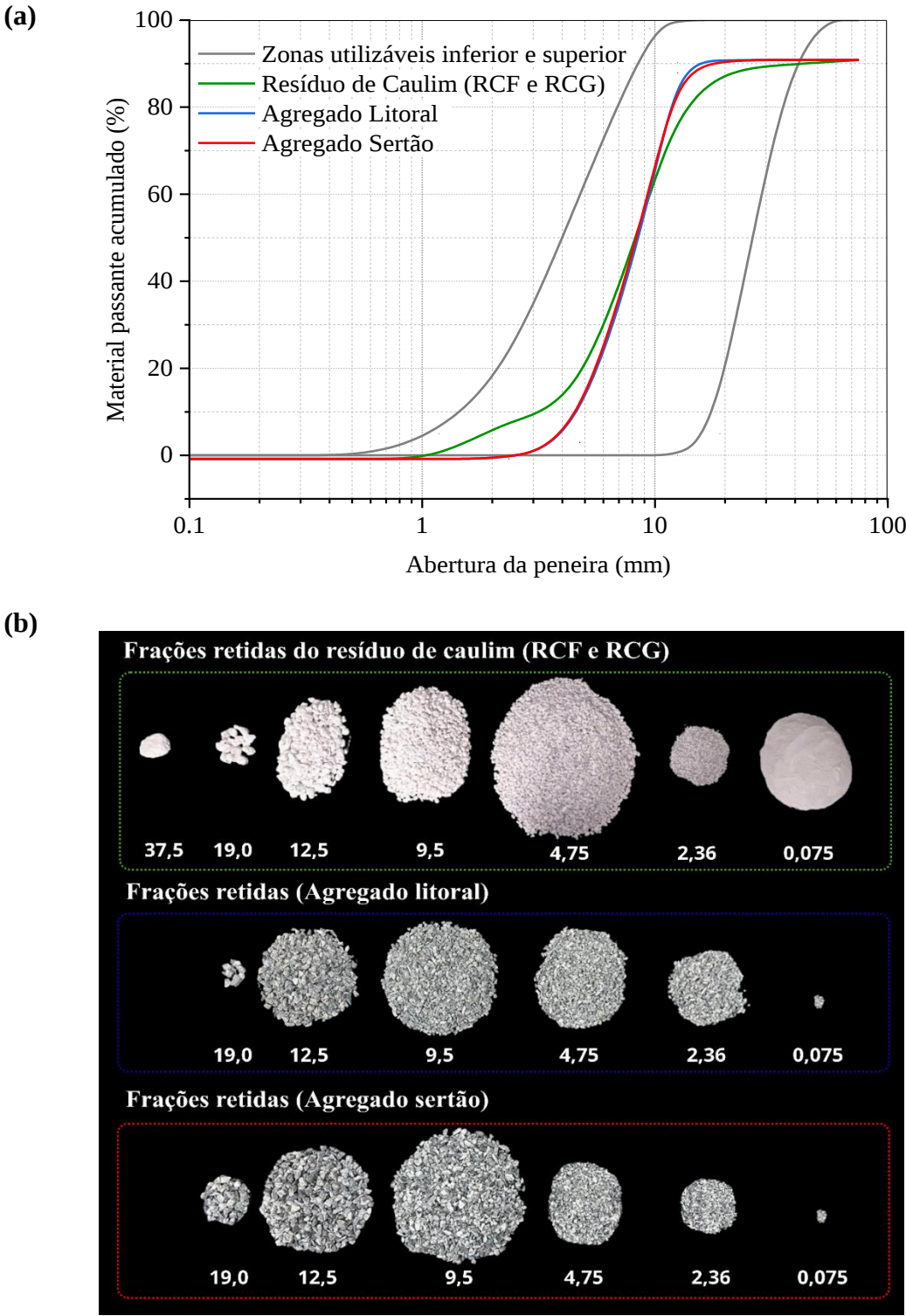
Figura 3.6 – (a) ensaio de índice de forma, ME 425 (DNIT, 2020); (b) ensaio de abrasão à Los Angeles, ME 451 (DNIT, 2024)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A curva granulométrica e as frações retidas nas diferentes malhas do ensaio de peneiramento desses materiais estão apresentadas nas Figuras 3.7a e 3.7b, respectivamente.

Figura 3.7 – Caracterização física dos materiais grossos: (a) curvas granulométricas do RC, do agregado litoral e do agregado sertão com os limites utilizados segundo a NBR 7211 (ABNT, 2022); (b) frações retidas nas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Tabela 3.4 apresenta os resultados desses ensaios de caracterização, bem como os de massa específica real e aparente (unitária).

Tabela 3.4 – Resultados da massa específica real e aparente (unitária) do MK, CP V ARI, RCF, RCG e agregados naturais do Litoral e Sertão. Índice de forma e abrasão a Los Angeles do RCG e dos agregados naturais do litoral e do sertão

Ensaio/ Normas	Materiais					Agregados litoral e sertão
	MK	CP V ARI	RCF	RCG		
						
Massa específica (g/cm ³)	2,59	2,99	1,46	1,68		2,60
Massa unitária (g/cm ³)	0,52	0,97	1,27	1,19		1,39
Índice de forma	-	-	-	1,88	1,59	1,81
				(12,5mm)	(12,5mm)	(12,5 mm)
				1,94	1,80	1,78
Abrasão a Los Angeles (%)	-	-	-	(9,5mm)	(9,5mm)	(9,5 mm)
				63,83%> 35%	23,30%< 35%	25%< 35%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Constatou-se que as propriedades de ambos os agregados eram adequadas ao uso em concreto de modo geral, pois estão entre as zonas utilizáveis determinadas pela NBR 7211 (ABNT, 2022). Observou-se ainda elevada semelhança entre as características dos materiais, apesar da distância geográfica entre os locais de coleta, o que sugere potencial de reprodutibilidade dos resultados em diferentes regiões da Paraíba. Contudo, foram utilizados nas misturas o agregado de João Pessoa, principalmente por questões logísticas relacionadas ao transporte, visto que a pesquisa foi realizada na mesma cidade.

A análise granulométrica dos materiais grossos utilizados, apresentada na Figura 3.7a, evidencia que os agregados naturais graníticos, tanto do litoral quanto do sertão, apresentam curvas de distribuição de tamanho de partículas bastante próximas, indicando características granulométricas semelhantes. Observa-se, ainda, que o resíduo de caulim apresenta partículas predominantemente menores e mais finas, com maior proporção de material passando pelas peneiras menores, atuando como um agente de preenchimento de vazios, o que pode contribuir para o aumento da densidade aparente e para a capacidade adsorvente do concreto.

Ainda acerca dos resultados da caracterização física dos materiais grossos, foi constatado que o índice de forma do RCG é maior que o dos agregados naturais, indicando uma maior razão entre as dimensões longitudinais e transversais dos grãos. Quanto ao desgaste em Los Angeles, foi constatado que o RCG possui uma perda de 63,83%, não podendo ser utilizado como agregado para compor misturas de pavimentos, dado bastante relevante no contexto do concreto permeável (muitas vezes utilizados em pavimentos). Esse comportamento era esperado em função da origem mineralógica do resíduo, proveniente de jazidas de extração de caulim, constituídas predominantemente por argilominerais, como a caulinita, que apresentam menor dureza (entre 2 e 2,5) quando comparados aos minerais presentes em agregados de origem granítica (aproximadamente 7), que foi utilizado como agregado graúdo.

A caracterização dos materiais optou-se pela adição do resíduo de caulim no lugar da substituição, isso fundamentou-se em três diretrizes principais: (i) a necessidade de compreender sua contribuição para o desempenho adsorativo do concreto permeável; (ii) o fato de que, por não atender aos requisitos do ensaio de abrasão Los Angeles, o resíduo não pode ser empregado como agregado graúdo, inviabilizando sua substituição direta; e (iii) as dimensões das partículas do resíduo, inferiores às do agregado natural, que podem favorecer o empacotamento granular, melhorar o arranjo microestrutural e, potencialmente, contribuir para o aumento da resistência mecânica das misturas.

Os teores de adição de resíduos entre 10% e 40% foram definidos em função das propriedades nos estados fresco e endurecido das misturas dos concretos permeáveis, uma vez que testes realizados com teores superiores resultaram em misturas com propriedades no estado fresco inadequadas para aplicações em concretos permeáveis.

3.3 Composição das misturas de pastas cimentícias e concretos permeáveis

O concreto permeável é constituído essencialmente por duas fases: a pasta cimentícia e o agregado graúdo. Nesta pesquisa, adotou-se a proporção 1:3:0,30–0,40, correspondente a uma parte de cimento com teores de metacaulim para três partes de agregado natural com adições parciais em até 40% pelos resíduos de caulim, e fator água/finos variando entre 0,30 e 0,40, sendo controlado pela trabalhabilidade da mistura. Essa proporção da mistura foi definida com base em revisão da literatura, com o objetivo de obter uma mistura com maior teor de pasta, favorecendo a densificação da matriz cimentícia.

Inicialmente, procedeu-se ao estudo da pasta cimentícia que compõe as misturas de concreto permeável. Foram analisados cinco tipos de misturas de pastas, todas com proporção

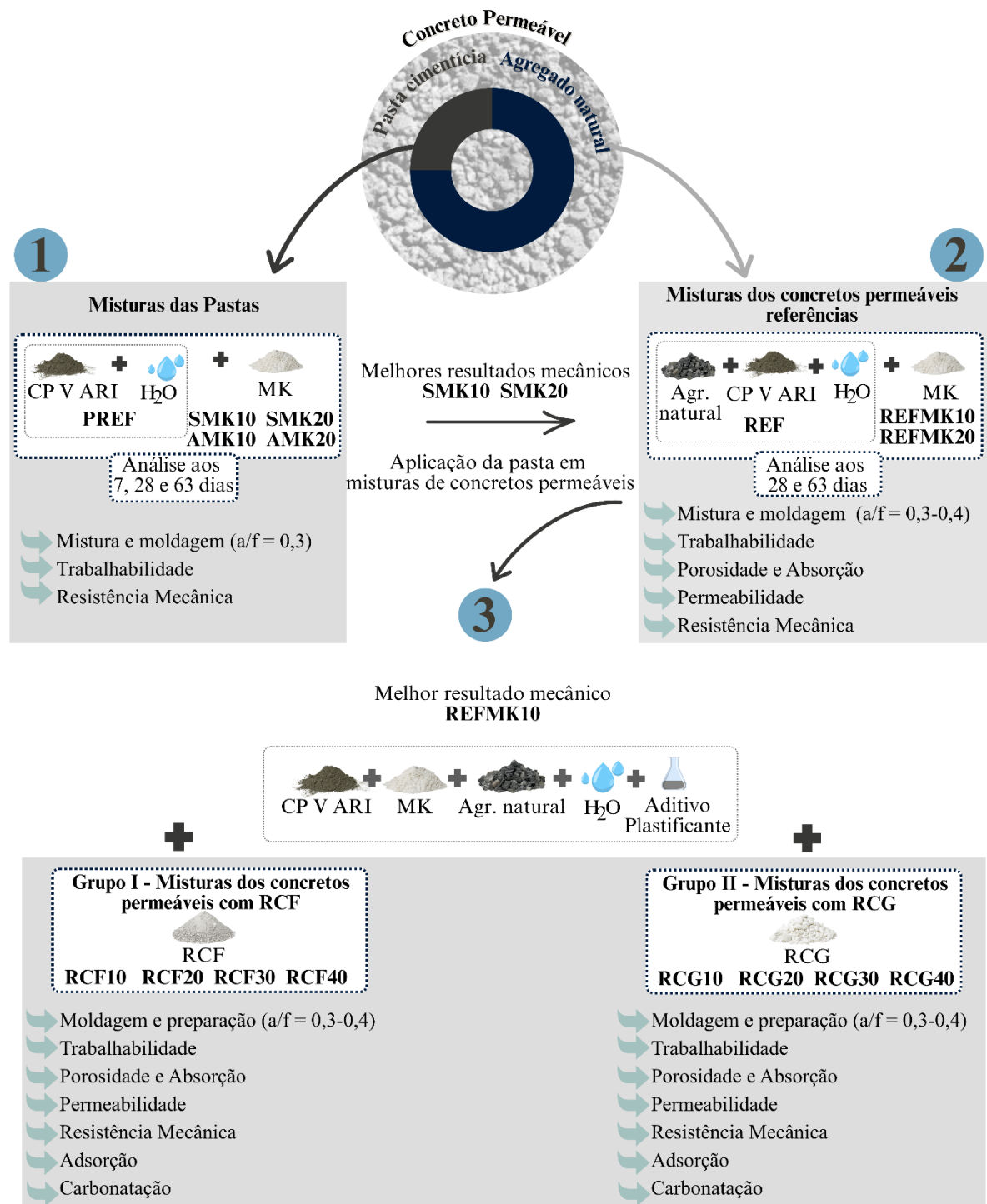
1:0,3 (cimento-metacaulim: água/finos), sendo uma mistura de referência (PREF), composta exclusivamente por cimento; misturas com substituições de 10% e 20% de metacaulim em relação à massa de cimento (SMK10 e SMK20); e misturas com adições de 10% e 20% de metacaulim, também em relação à massa de cimento (AMK10 e AMK20). A escolha desse percentual foi baseada em pesquisas anteriores que utilizaram a incorporação de materiais pozolânicos, como as desenvolvidas por Jindal e Ransinchung (2022), Araújo (2019) e Li *et al.* (2017). As pastas que apresentaram melhor desempenho mecânico foram posteriormente empregadas nas misturas de referência dos concretos permeáveis analisados.

Dessa forma, as misturas de referência dos concretos permeáveis continham agregados naturais e 0%, 10% e 20% de metacaulim em substituição à massa de cimento, correspondentes às pastas com melhores desempenhos mecânicos (REF, REFMK10 e REFMK20). Essa estratégia permitiu a redução do consumo de cimento e, potencialmente, o aprimoramento das propriedades microestruturais da interface pasta-agregado. Com base nos resultados das propriedades do estado endurecido, selecionou-se a mistura que apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho mecânico, propriedades físicas e hidráulicas compatíveis com o comportamento esperado para concretos permeáveis.

Na sequência, avaliou-se a influência de diferentes teores de RCF e RCG sobre as propriedades físicas, mecânicas, hidráulicas, adsorptivas e de durabilidade das misturas. Para tal, foram definidos dois grupos de formulações: o primeiro incorporou teores de RCF variando entre 10% e 40% em relação à massa do agregado graúdo (RCF10, RCF20, RCF30 e RCF40), enquanto o segundo adotou o mesmo intervalo de adição, porém utilizando RCG (RCG10, RCG20, RCG30 e RCG40). Destaca-se que os ajustes no teor de água e no aditivo plastificante (Tabela 3.6) foram necessários para manter a trabalhabilidade das misturas, em razão das características físicas dos resíduos. Dessa forma, as comparações referem-se ao desempenho global de misturas tecnicamente ajustadas, e não ao efeito isolado dos resíduos sob uma mesma relação água/finos.

O esquema experimental adotado encontra-se sintetizado na Figura 3.8, enquanto as descrições e as quantidades de materiais empregadas em cada formulação são apresentadas na Tabela 3.6.

Figura 3.8 – Esquema experimental e composições estudadas das pastas e dos concretos permeáveis



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 3.5 – Composições em massa das misturas contendo CP V ARI, MK, RCF, RCG, Agr. Natural, água e aditivo plastificante

Mistura			Materiais (g/cm³)						
	Sigla	Descrição	CP V ARI	MK	Agr. natural	RCF	RCG	Água	Aditivo plastificante
PASTA CIMENTÍCIA	PREF	CP V ARI	1,563	—	—	—	—	0,469	—
	SMK10	Substituição de 10% de CP V ARI por MK	1,407	0,156	—	—	—	0,469	—
	SMK20	Substituição de 20% de CP V ARI por MK	1,251	0,312	—	—	—	0,469	—
	AMK10	Adição de 10% de MK em relação ao CP V ARI	1,563	0,156	—	—	—	0,516	—
	AMK20	Adição de 20% de MK em relação ao CP V ARI	1,563	0,312	—	—	—	0,563	—
Mistura			Materiais (kg/m³)						
	Sigla	Descrição	CP V ARI	MK	Agr. natural	RCF	RCG	Água	Aditivo plastificante
CONCRETOS PERMEÁVEIS	REF	CP V ARI	442,4	—	1327,21	—	—	141,57	—
	REFMK10	Substituição de 10% de CP V ARI por MK	398,2	44,2	1327,21	—	—	141,57	—
	REFMK20	Substituição de 20% de CP V ARI por MK	353,92	88,4	1327,21	—	—	141,57	—
	RCF10	REFMK10 com adição de 10% de RCF	437,97	48,66	1327,21	132,72	—	194,65	4,38
	RCF20	REFMK10 com adição de 20% de RCF	477,79	53,08	1327,21	265,44	—	212,35	4,78
	RCF30	REFMK10 com adição de 30% de RCF	517,61	57,51	1327,21	398,16	—	230,04	5,17
	RCF40	REFMK10 com adição de 40% de RCF	619,29	61,92	1327,21	530,88	—	272,50	6,19
	RCG10	REFMK10 com adição de 10% de RCG	437,97	48,66	1327,21	—	132,72	194,65	4,38
	RCG20	REFMK10 com adição de 20% de RCG	477,79	53,08	1327,21	—	265,44	212,35	4,78
	RCG30	REFMK10 com adição de 30% de RCG	517,61	57,51	1327,21	—	398,16	230,04	5,17
	RCG40	REFMK10 com adição de 40% de RCG	619,29	61,92	1327,21	—	530,88	272,50	6,19

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

3.4 Métodos de ensaio aplicados às pastas cimentícias e aos concretos permeáveis

3.4.1 Métodos e ensaios aplicados às pastas cimentícias

Os tópicos a seguir descrevem os métodos e ensaios aplicados às pastas cimentícias nos estados fresco e endurecido. No estado fresco, são apresentados os procedimentos de mistura, avaliação da trabalhabilidade e moldagem. No estado endurecido, são contemplados os ensaios de resistência à flexão e à compressão, aplicados às misturas sem e com substituições ou adições de metacaulim (MK).

A Tabela 3.7 sintetiza os métodos e ensaios, as normas correspondentes e a quantidade de corpos de prova prismáticos (CPP) empregados nas pastas cimentícias.

Tabela 3.6 – Métodos e ensaios, normas e quantidade de corpos de prova empregados nas misturas de pastas estudadas

Método	Norma	Quantidade de corpos de prova prismáticos (CPP)
Trabalhabilidade e moldagem	NBR 13276 (ABNT, 2005)	-
Resistência à flexão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	4 CPP por idade e por mistura (7, 28 e 63 dias), totalizando 60 CPP Metades remanescentes do ensaio de flexão, totalizando 120 CP
Resistência à compressão		

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4.1.1 Estado fresco das pastas cimentícias: procedimento de mistura, trabalhabilidade e moldagem

As misturas foram preparadas com base no procedimento descrito na ASTM C305, com adaptações referentes à pré-homogeneização do metacaulim e à adição da água em duas etapas.

Inicialmente, as misturas foram preparadas em argamassadeira planetária, com capacidade de 5 L, operando em baixa rotação (140 rpm) e alta rotação (285 rpm), conforme a ASTM C305 (ASTM, 2014). Para as misturas contendo metacaulim, o cimento Portland CP V ARI foi previamente homogeneizado com o MK por um período de 1 minuto, visando garantir a distribuição uniforme do material pozolânico.

Em seguida, foi adicionado 50 % da água procedendo-se à mistura por 1 minuto na menor rotação do equipamento. Posteriormente, realizou-se a limpeza das paredes internas do recipiente e da pá do misturador, sendo então incorporados os 50 % restantes da água. A mistura

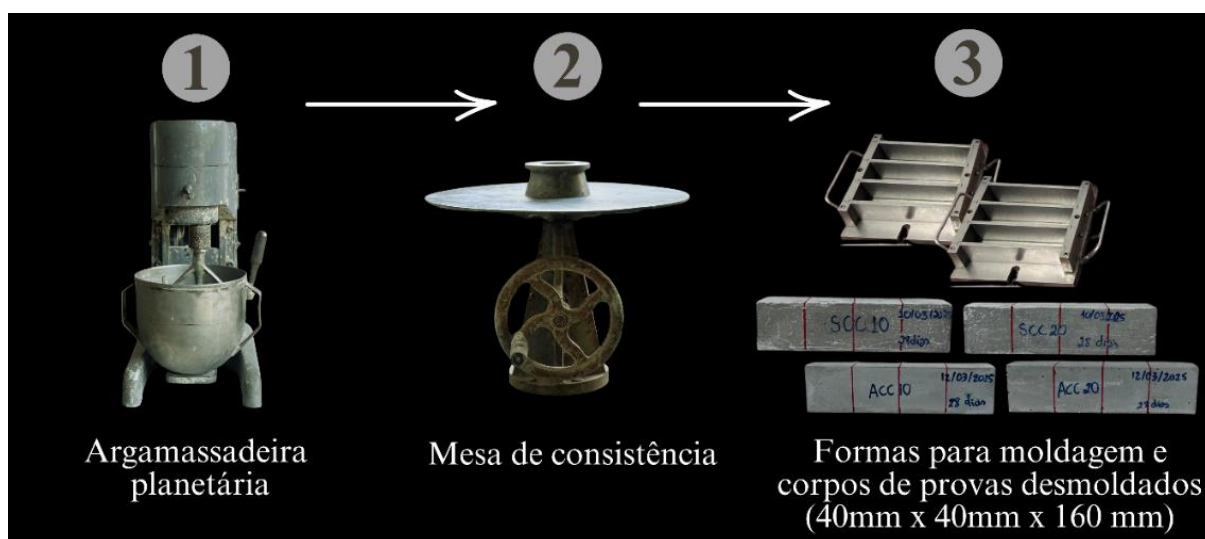
foi novamente processada por mais 1 minuto, em rotação de 285 rpm, de modo a garantir a adequada homogeneização da pasta.

Após o preparo, procedeu-se à avaliação da consistência das pastas por meio do ensaio de espalhamento, utilizando-se o *Mini Slump Flow Test* na mesa de consistência. O ensaio foi conduzido mediante a aplicação dos golpes padronizados, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2005), seguida da medição do diâmetro médio de espalhamento da pasta.

Na sequência, foram moldados corpos de prova prismáticos com dimensões de 40 mm × 40 mm × 160 mm, conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 13279 (ABNT, 2005). Ressalta-se que, embora a norma seja destinada a misturas de argamassa, seus procedimentos foram devidamente adaptados para as misturas de pasta, conforme metodologia adotada por Vieira (2010).

Após 24 h da moldagem, os CPP foram desmoldados e submetidos à cura úmida submersa, em recipiente contendo água saturada com cal, mantida à temperatura controlada de 28 °C, até as idades de ensaio de 7, 28 e 63 dias. Esses procedimentos foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LABEME/UFPB). A Figura 3.9 apresenta os métodos descritos nesta seção.

Figura 3.9 – Equipamentos utilizados para: 1 – mistura; 2 - análise da trabalhabilidade e 3 - moldagem das pastas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4.1.2 Estado endurecido das pastas cimentícias: resistência à tração na flexão e à compressão

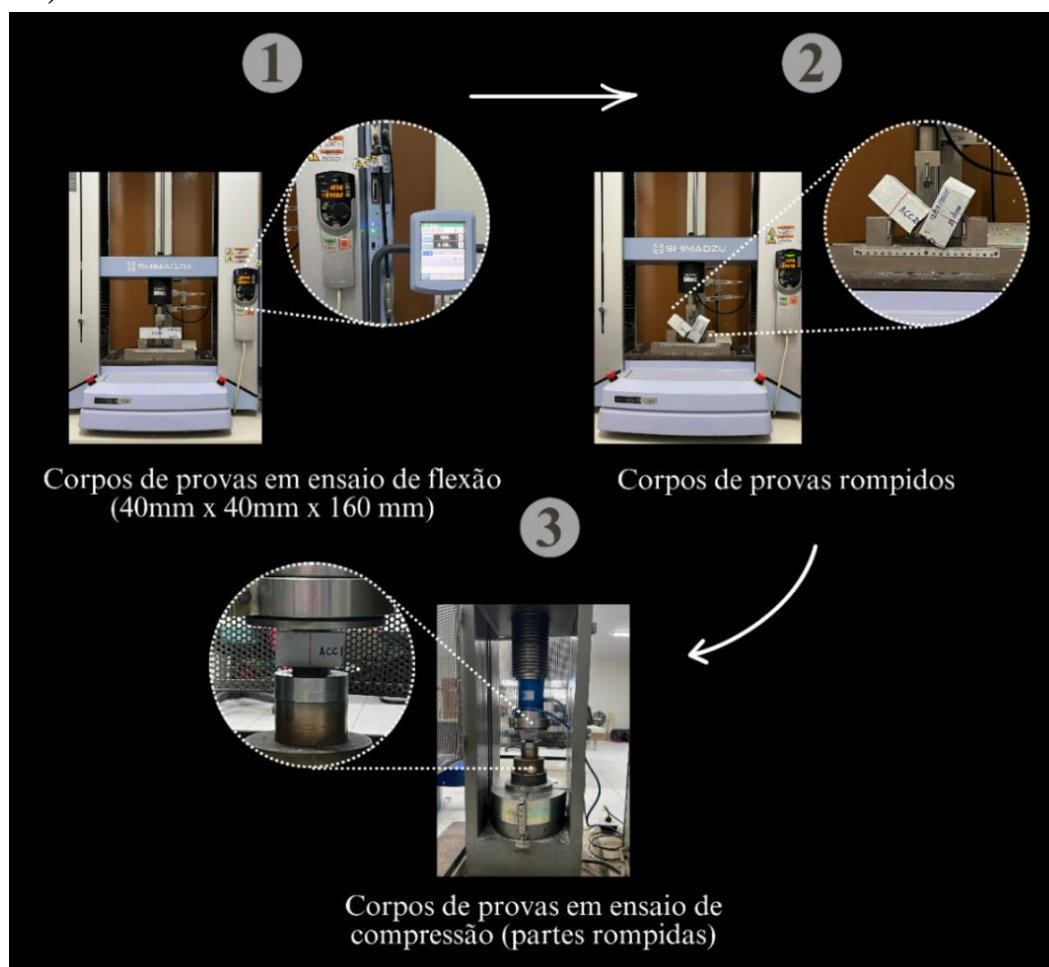
As pastas endurecidas foram submetidas ao ensaio de tração na flexão e, posteriormente, ao ensaio de compressão nas metades resultantes da ruptura, conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 13279 (ABNT, 2005).

Os ensaios foram realizados aos 7, 28 e 63 dias de cura, com o objetivo de analisar a evolução da resistência mecânica das pastas ao longo do tempo, associada ao desenvolvimento das reações de hidratação e pozolânicas (Dias *et al.*, 2020; Dassoler *et al.*, 2021).

Os ensaios de flexão foram realizados em máquina Universal de Ensaio, fabricante Shimadzu, modelo Autograph AG-X 10 kN. Já os de compressão realizaram-se na prensa Pavitest HD-200 servo controlada. A utilização de equipamentos distintos ocorreu devido às limitações operacionais relacionadas à capacidade e à configuração dos dispositivos de carregamento, de modo que não foi possível realizar ambos os ensaios adequadamente em uma única máquina.

Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e no Laboratório de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), ambos localizados no município de João Pessoa, PB. A Figura 3.10 ilustra os métodos descritos nesta seção.

Figura 3.10 – Método de ensaios: 1 e 2 - resistência à tração na flexão e 3 – resistência à compressão (área comprimida)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

3.4.2 Métodos de ensaios aplicados aos concretos permeáveis

Neste tópico são apresentados os métodos de ensaio aplicados aos concretos permeáveis, com e sem adição do resíduo de caulim fino (RCF) e do resíduo de caulim grosso (RCG). São apresentados os procedimentos realizados no estado fresco, incluindo a avaliação da trabalhabilidade e a moldagem, e no estado endurecido, contemplando os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e perda de massa por desgaste por abrasão, bem como a obtenção dos corpos de prova. Adicionalmente, foram conduzidas análises de adsorção de íons metálicos presentes em águas contaminadas (simuladas em laboratório) e de durabilidade frente ao processo de carbonatação.

Os métodos e ensaios no estado fresco foram realizados no Laboratório de Materiais do Centro Universitário de João Pessoa (Unipê) e os de propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas no Laboratório de Estruturas e Materiais da Universidade Federal da Paraíba (LABEME/UFPB). A Tabela 3.8 sintetiza os métodos e ensaios, as normas correspondentes e a quantidade de corpos de prova das misturas de concretos permeáveis estudados.

Tabela 3.7 – Ensaios e normas para caracterização dos materiais

Método	Norma	Quantidade de corpos de prova (28 e 63 dias)
Trabalhabilidade e moldagem	NBR 16889 (ABNT, 2020)	Para cada mistura
Índice de vazios	NBR 9778 (ABNT, 2005)	88 corpos de prova cilíndricos, 100 × 200 mm
Porosidade Python	-	9 corpos de prova quadráticos, 100 × 100 × 15 mm
Absorção por capilaridade	INP EN 772-11 (IPQ, 2002)	22 corpos de prova cilíndricos, 100 × 200 mm (após ensaio de porosidade)
Permeabilidade à carga variável	-	22 corpos de prova prismáticos, 100 × 100 × 400 mm (antes do ensaio de tração na flexão)
Permeabilidade à carga constante	522R-10 (ACI, 2010)	22 corpos de prova cilíndricos, 100 × 100 mm
Resistência à compressão	NBR 5739 (ABNT, 2018)	88 corpos de prova cilíndricos, 100 × 200 mm
Resistência à tração na flexão	EN 12390-5 (CEN, 2009)	88 corpos de prova prismáticos, 100 × 100 × 400 mm
Perda de massa por abrasão	ME 383 (DNER, 1999)	88 corpos de prova cilíndricos, 100 × 100 mm (seccionados após ensaio de porosidade)
Carbonatação	TS 12390-12 (CEN, 2010)	8 corpos de prova cúbicos, 50 × 50 × 100 mm (extraídos, após ensaio de flexão, contendo RCF e RCG)

Método	Norma	Quantidade de corpos de prova (28 e 63 dias)
Adsorção	-	9 corpos de prova cúbicos, 50 × 50 × 50 mm (extraídos após ensaio de flexão dos corpos de prova prismáticos – REFMK10 e com RCF e RCG)
Micro CT	-	9 corpos de prova cúbicos de 50 × 50 × 50 mm (extraídos após ensaio de flexão dos corpos de prova prismáticos – REFMK10 e com RCF e RCG)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4.2.1 Procedimento de mistura, trabalhabilidade, moldagem e extração dos corpos de prova dos concretos permeáveis

As misturas de concretos permeáveis foram preparadas em betoneira com capacidade de 30 L. A sequência de introdução dos materiais foi a seguinte: agregado graúdo e resíduo de caulim (quando aplicável), seguidos de 50% da massa total de cimento, 50% de metacaulim e 50% da água previamente misturada com o aditivo plastificante. Esta etapa inicial foi misturada por 2 minutos, garantindo o completo recobrimento dos agregados e resíduos pelo cimento e metacaulim. Em seguida, procedeu-se à raspagem interna da betoneira, a fim de remover o material aderido às paredes e evitar perdas.

Posteriormente, foram adicionados os 50% restantes de cimento e metacaulim, com ajuste gradual da água com aditivo até que a mistura atingisse a consistência adequada para concretos permeáveis. Ao final do preparo, a trabalhabilidade foi avaliada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020).

Os corpos de prova foram moldados com base na NBR 5738 (ABNT, 2015), com adaptações relacionadas ao adensamento manual, visando evitar segregação e fechamento excessivo dos vazios característicos do concreto permeável. A moldagem dos corpos de prova prismáticos (CPP) foi realizada em duas camadas, cada uma adensada com 15 golpes, utilizando soquete de base alargada, aplicados cuidadosamente para evitar segregação e preservar os canais de percolação. Para os corpos de prova cilíndricos (CPC), adotou-se procedimento análogo, porém com três camadas. Após o preenchimento da última camada, procedeu-se ao acabamento superficial visando à redução de irregularidades na superfície do corpo de prova. Adicionalmente, foram moldados dois CPC com diâmetro e altura de 100 × 100 mm, destinados ao ensaio de permeabilidade à carga constante, conforme a 522R-10 (ACI, 2010). Todos os

corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e submetidos à cura úmida submersa em água saturada com cal hidratada durante 28 dias e 63 dias.

Para cada mistura, foram moldados oito corpos de prova prismáticos (CPP – $100 \times 100 \times 400$ mm), destinados aos ensaios de permeabilidade à carga variável e de tração na flexão, conforme a EN 12390-5 (2009), aos 28 e 63 dias, totalizando 88 unidades. Após os ensaios destrutivos aos 63 dias, foram extraídas das misturas de referência e daquelas que continham RCF e RCG amostras de $100 \times 100 \times 15$ mm para análise qualitativa dos vazios, por meio de procedimentos desenvolvidos em linguagem Python, totalizando 11 unidades. Além disso, foram obtidas duas amostras cúbicas de $50 \times 50 \times 50$ mm por mistura para os ensaios de adsorção e uma amostra de mesma dimensão para o ensaio de micro-CT, totalizando 19 unidades. Adicionalmente, foram obtidas amostras para o ensaio de carbonatação, totalizando 8 unidades.

No caso dos corpos de prova cilíndricos (CPC – 100×200 mm), foram moldadas 16 unidades por mistura, totalizando 176 CPC. Desses, oito foram destinados ao ensaio de resistência à compressão uniaxial, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), aos 28 e 63 dias, e os outros oito aos ensaios de porosidade ou índice de vazios (NBR 9778, ABNT, 2005) e absorção por capilaridade (IPQ NP EN 772-11, 2002). Após esses ensaios, de caráter não destrutivo, dois CPC por mistura foram seccionados, originando amostras de 100×100 mm, posteriormente submetidas ao ensaio de desgaste por abrasão, aos 28 e 63 dias, conforme a ME 383 (DNER, 1999), totalizando 88 unidades. A Figura 3.11 ilustra os métodos descritos nesta seção, bem como o procedimento de extração dos corpos de prova.

Figura 3.11 – Procedimento de mistura, avaliação da trabalhabilidade, moldagem e extração dos corpos de prova das misturas de concreto permeável estudadas



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

3.4.2.2 Estado endurecido dos concretos permeáveis: propriedades físicas, hidráulicas, mecânicas, adsorptivas e durabilidade

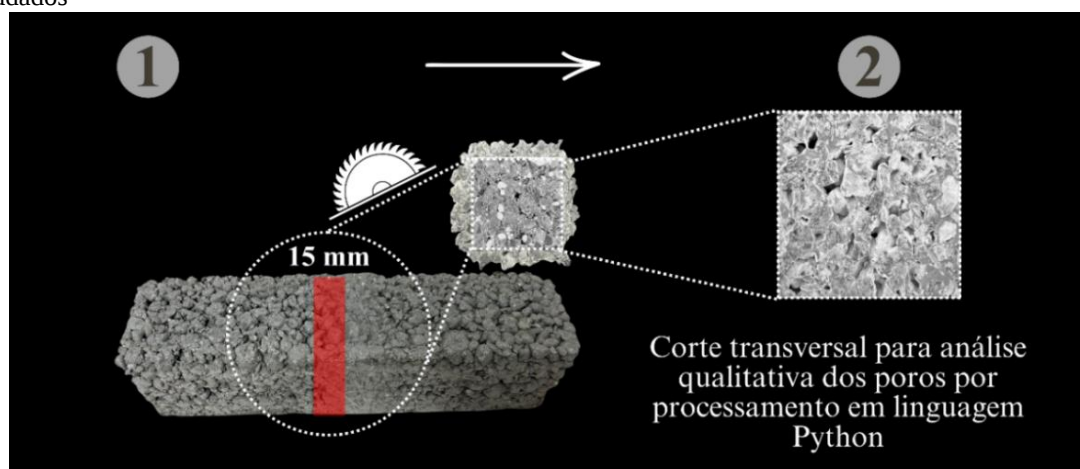
Os tópicos a seguir descrevem, de forma detalhada, os procedimentos de ensaios físicos (porosidade e absorção por capilaridade), hidráulicos, mecânicos, análise adsorptiva e análise da durabilidade frente à carbonatação aplicados aos concretos permeáveis estudados.

3.4.2.2.1 Porosidade, absorção por capilaridade e permeabilidade dos concretos permeáveis

A porosidade das misturas foi inicialmente determinada pelo método convencional do índice de vazios, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005). No entanto, por se tratar de um método desenvolvido para concretos convencionais e considerando que o concreto permeável apresenta estrutura altamente porosa, aplicou-se um método complementar de Silva *et al.* (2022), baseado em processamento digital de imagens para caracterização qualitativa e quantitativa dos vazios. Dessa forma, as amostras provenientes dos CPP rompidos aos 63 dias foram seccionadas de modo a expor suas superfícies internas, que foram posteriormente registradas em alta resolução.

As imagens obtidas passaram por etapas de pré-processamento, incluindo conversão para escala de cinza, filtragem e segmentação morfológica, permitindo distinguir a matriz cimentícia, o RCF, o RCG e os vazios. O software, desenvolvido em Python, utilizou as bibliotecas *NumPy* e *Python Imaging Library* (PIL) para análise de pixels RGB (*Red, Green, Blue*), gerando mapas binários em escala de cinza e pseudo-coloridos, nos quais os vazios foram representados em azul-escuro, a matriz cimentícia em verde e os resíduos de caulim (fino e grosso) em amarelo. A Figura 3.12 ilustra os métodos descritos nesta seção.

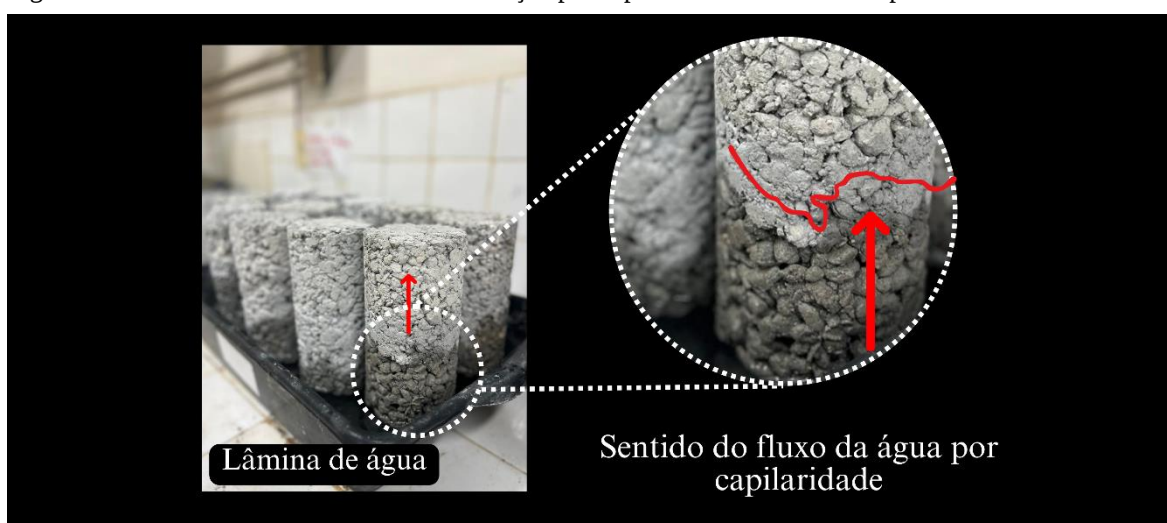
Figura 3.12 – Procedimento para obtenção de amostra para análise qualitativa dos poros dos concretos permeáveis estudados



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O ensaio de absorção por capilaridade em corpos de prova de concreto foi adaptado dos procedimentos sugeridos pela NP EN 772-11 (IPQ, 2002). Para isso, os corpos de prova foram previamente secos até massa constante e, em seguida, colocados com uma das faces em contato com água. Ao longo do tempo, inicialmente horas e posteriormente até os 7 dias, período no qual as amostras apresentaram estabilização da massa absorvida, indicando redução da ascensão capilar. Foram registradas as variações de massa, permitindo calcular a taxa de absorção de água por capilaridade. O ensaio foi realizado em amostras após 28 e 63 dias de cura. A Figura 3.13 ilustra os métodos descritos nesta seção.

Figura 3.13 – Procedimento de análise de absorção por capilaridade dos concretos permeáveis estudados



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O ensaio de permeabilidade à carga constante foi realizado seguindo o procedimento do 522R-10 (ACI, 2010), utilizando um permeâmetro adaptado para concretos permeáveis, que rege o ensaio para carga constante (Ximenes, 2024).

O sistema consistiu em utilizar um suporte de PVC equipado com registro conectado a um corpo de prova cilíndrico de 100 mm de diâmetro e 100 mm de altura. O corpo de prova foi concretado no próprio molde, posicionado no suporte e fixado de forma a garantir estanqueidade durante o ensaio. A água foi aplicada na entrada do permeâmetro sob carga constante, enquanto a saída foi monitorada para registrar o escoamento do fluido através do concreto.

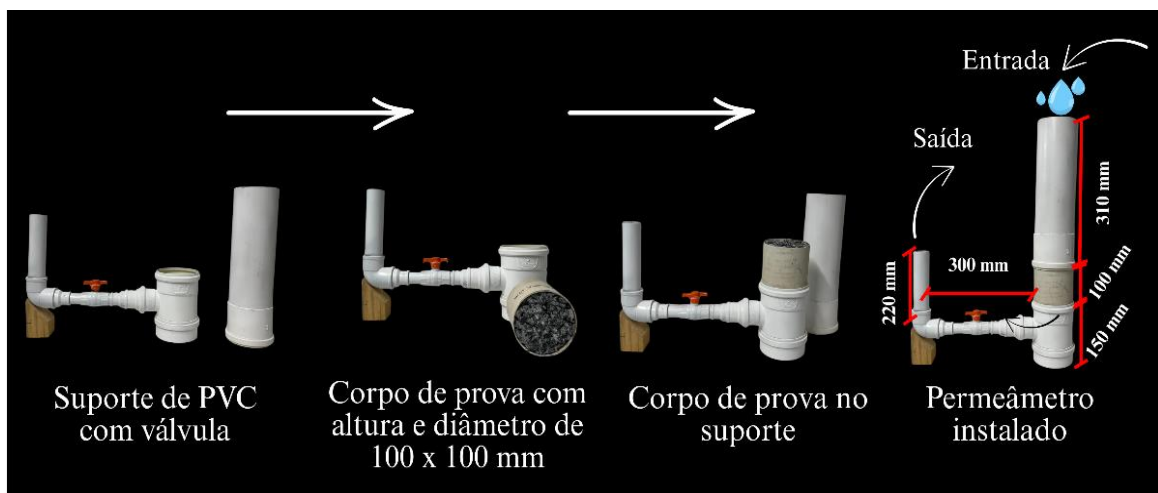
A permeabilidade também foi aferida para o procedimento em carga variável, no qual o corpo de prova foi fixado com silicone. Nesse contexto, o coeficiente de permeabilidade foi calculado conforme a Equação 2.

$$K = \frac{c \times m}{d^2 \times t} \quad (2)$$

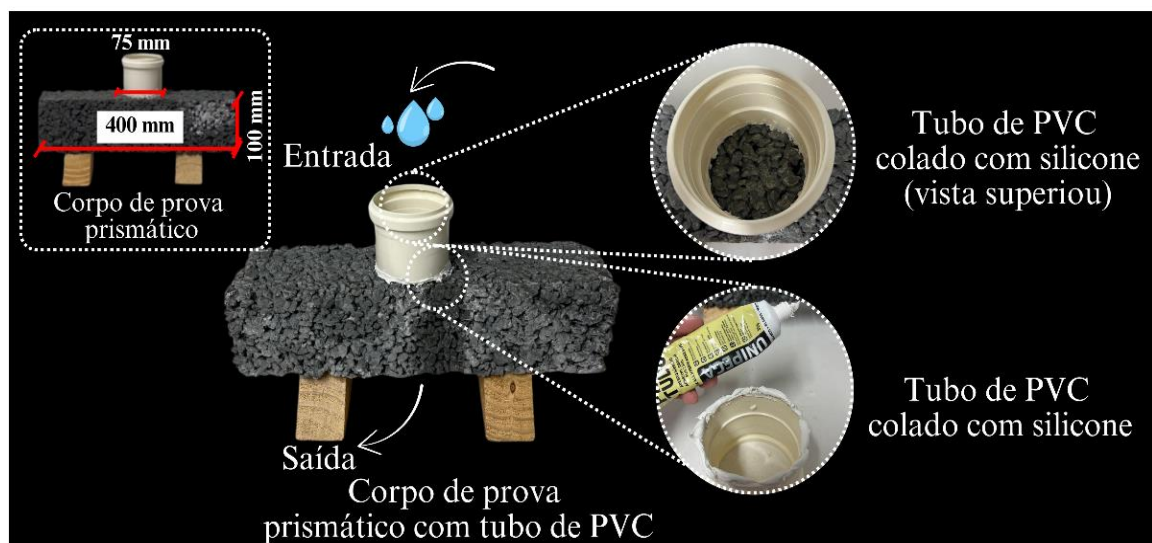
Onde c é uma constante (1273,2), m é a massa do fluido infiltrante (kg), d é o diâmetro interno do cilindro (mm) e t é o tempo de percolação (s). Os procedimentos acerca dos ensaios hidráulicos foram realizados em amostras saturadas e não saturadas, com o objetivo de entender a funcionalidade do concreto permeável após ciclos de chuva e de avaliar a taxa de infiltração da água por unidade de tempo, fundamental para caracterizar o desempenho hidráulico desses concretos. As Figuras 3.14a e 3.14b ilustram os métodos descritos para avaliação da capacidade hidráulica.

Figura 3.14 – Procedimento ilustrativo do ensaio para obtenção do coeficiente de permeabilidade em amostras secas e saturadas: (a) carga constante; (b) carga variável

(a)



(b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

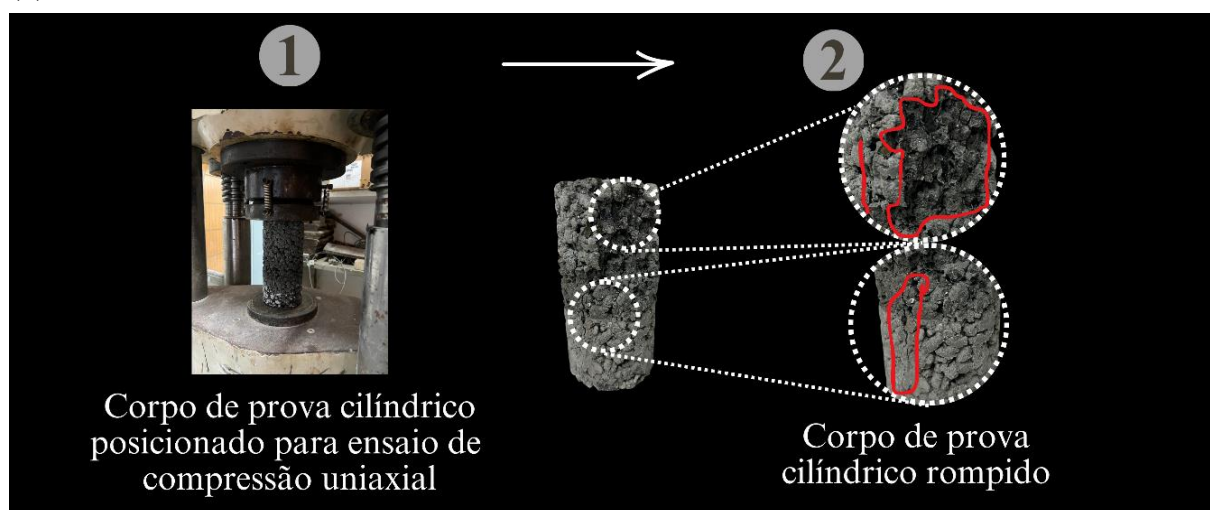
3.4.2.2 Ensaios no estado endurecido: Resistência à compressão, à tração na flexão e perda de massa por abrasão dos concretos permeáveis

Os ensaios destrutivos compreenderam a avaliação da resistência à compressão uniaxial, realizada conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), utilizando corpos de prova cilíndricos, com o objetivo de determinar a capacidade de suporte de carga do material. A resistência à tração na flexão foi determinada de acordo com a EN 12390-5 (CEN, 2009), por meio de ensaio de carregamento em dois pontos. Adicionalmente, a resistência ao desgaste foi avaliada por meio do ensaio de abrasão do tipo Cântabro, conforme o método ME 383 (DNER, 1999), que quantifica a perda de massa dos corpos de prova após a ação abrasiva resultante do impacto e do atrito em tambor rotativo. Esses procedimentos permitem caracterizar, de forma integrada, o desempenho mecânico das misturas analisadas.

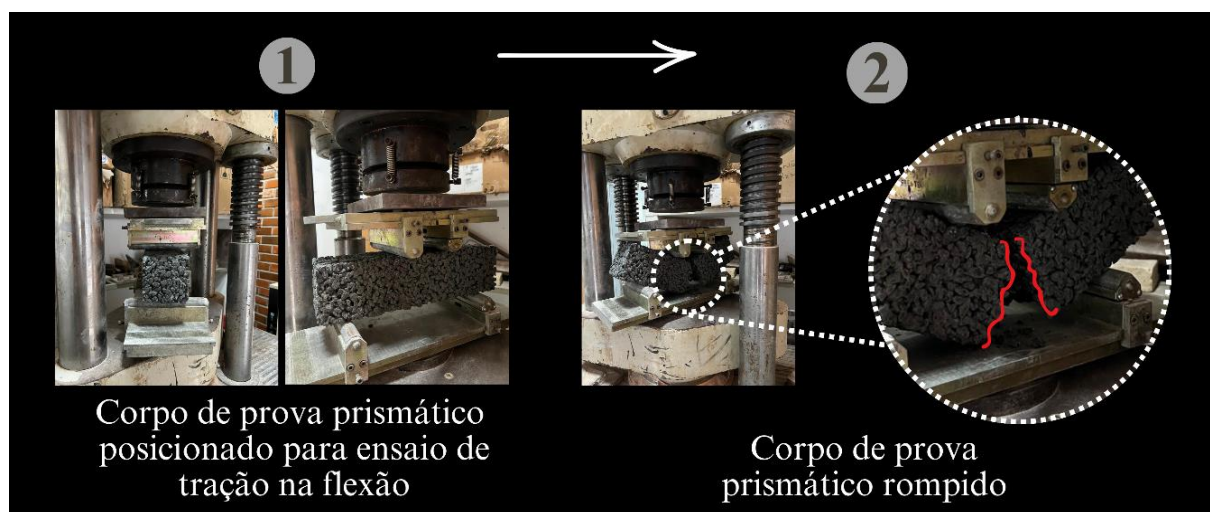
Os ensaios mecânicos de compressão uniaxial e de tração na flexão foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaios com capacidade de carga de 980.665 N, da marca Contenco. A aplicação de carga foi realizada de forma contínua e controlada, com incremento de tensão na faixa de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s para os ensaios de compressão uniaxial e de $1,0 \pm 0,1$ MPa/min para os ensaios de tração na flexão. O ensaio de abrasão do tipo Cântabro foi realizado em máquina sem carga abrasiva de esferas de aço, com número de revoluções e velocidade indicados na ME 383 (DNER, 1999) da marca Contenco, operando com rotação compreendida entre 30 e 33 rpm. As Figuras 3.15a, 3.15b e 3.15c ilustram os métodos descritos nesta seção.

Figura 3.15— Procedimento dos ensaios de resistência mecânica: (a) resistência à compressão; (b) resistência à tração na flexão e (c) perda de massa por abrasão

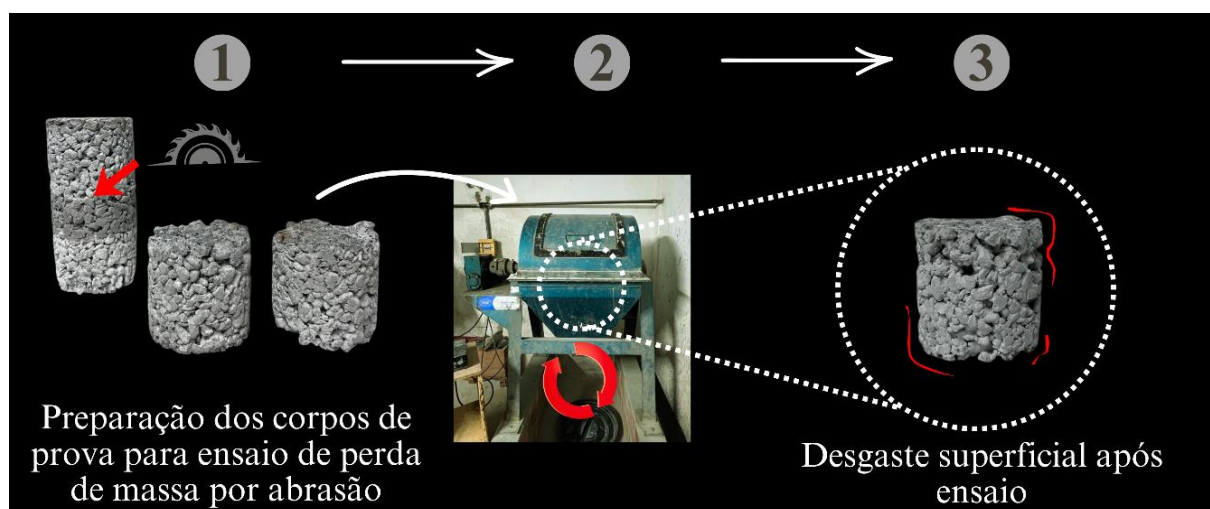
(a)



(b)



(c)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4.2.2.3 Ensaio da adsorção dos concretos permeáveis

A capacidade adsortiva do concreto permeável está diretamente relacionada com a capacidade do concreto de reter poluentes; essa propriedade está diretamente relacionada com suas características físicas e químicas. Dessa forma, realizou-se a investigação física com análise da textura superficial e uma análise interna pelo micro-CT e química por meio do ensaio de adsorção.

A análise da textura superficial foi realizada com o objetivo de investigar se suas características morfológicas podem influenciar o potencial de adsorção de íons de metais pesados. Para isso, foi utilizado um microscópio digital com sensor CMOS, com resolução de até 1920×1440 pixels e capacidade de ampliação de até 1600×. O equipamento possui iluminação ajustável por LEDs embutidos e foco variável entre 15 e 45 mm, permitindo a

captura de imagens de alta definição das superfícies internas e externas dos corpos de prova. As micrografias obtidas foram analisadas quanto à rugosidade aparente, presença de poros acessíveis na superfície e heterogeneidades associadas aos resíduos de caulim adicionados, fornecendo subsídios para correlacionar a textura superficial com o comportamento adsorativo observado nos ensaios químicos. Esse método foi realizado no LABEME/UFPB.

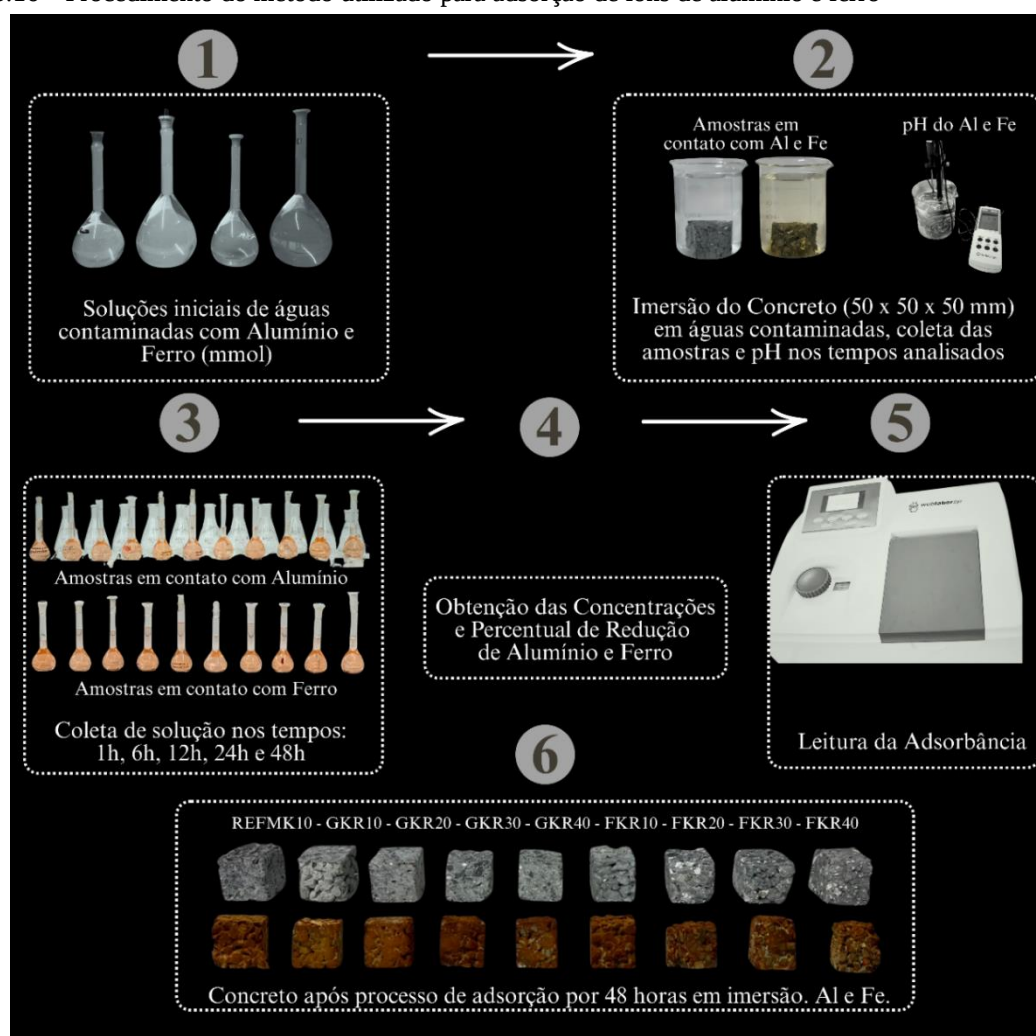
Complementar a análise da textura superficial, a microtomografia computadorizada por raios X (micro-CT) foi utilizada para adquirir imagens tridimensionais de alta resolução dos corpos de prova e para quantificar sua porosidade interna. A aquisição das imagens, com tamanho de voxel de 25 μm , foi realizada utilizando um equipamento Bruker SkyScan 1275 (Bruker microCT, Kontich, Bélgica), equipado com uma fonte de raios X operando a 100 kV e 100 μA , com filtro de cobre (Cu) de 1 mm e passo de 0,200°, ao longo de uma rotação completa de 360°. Os softwares Recon, DataViewer, CTAn e CTVox (Bruker microCT, Kontich, Bélgica) foram utilizados para a reconstrução, inspeção das projeções, análise quantitativa e visualização tridimensional, respectivamente.

A análise quantitativa foi realizada no software CTAn, no qual a região de interesse foi definida por interpolação e binarizada utilizando um limiar global de 26–255, a partir do qual as porosidades abertas, fechadas e totais foram quantificadas por meio de análise morfométrica tridimensional. A visualização dos volumes reconstruídos foi realizada no software CTVox. Esse método foi realizado no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, Portugal.

A análise química foi realizada por meio do ensaio de adsorção do corpo de prova imerso na água contaminada. Para a realização desse ensaio, tomou como base os métodos de análise realizados por Krishnan *et al.* (2022) e Li *et al.* (2024). Para avaliar o potencial adsorativo das misturas de Concreto Permeável, os corpos de prova foram imersos em soluções sintéticas contendo íons de alumínio e ferro. Inicialmente, preparou-se uma solução padrão de 1 mmol a partir de sais metálicos de grau analítico. A concentração dos íons de alumínio foi estabelecida segundo o método de Eriochrome Cyanine R, conforme descrito nos *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WEF, 2017). Para os íons de ferro, adotou-se o procedimento recomendado pelo *Manual de Análises Físico-Químicas de Águas de Abastecimento e Residuárias* (FUNASA, 2013). A partir desses protocolos, foram obtidas as soluções de trabalho com concentrações iniciais de 26,98 mg/L para Al^{3+} e 55,85 mg/L para Fe^{2+} . Após a imersão, alíquotas do sobrenadante foram coletadas nos tempos de 1, 6, 12, 24 e 48 horas, que sumulariam as primeiras horas de chuvas, período de ocorrência da *first flush*.

A quantificação dos metais foi realizada por colorimetria, mediante adição de reagentes capazes de produzir coloração proporcional à concentração remanescente. A preparação desses reagentes seguiu as recomendações do método de Eriochrome Cyanine R para Al^{3+} e do manual da FUNASA para Fe^{2+} . As leituras de absorbância foram realizadas no equipamento WebLabor, e os valores obtidos foram convertidos em concentração por meio das curvas padrão previamente estabelecidas. Em paralelo, o pH das soluções foi monitorado nos mesmos intervalos, a fim de controlar eventuais elevações de alcalinidade induzidas pela matriz cimentícia, especialmente relacionadas à liberação de hidróxidos. Esse procedimento permitiu caracterizar de forma controlada o comportamento adsorptivo das misturas e verificar a influência da incorporação do resíduo de caulim no sistema químico. Esse método foi realizado no Laboratório de Saneamento da UFPB e a Figura 3.16 apresenta o procedimento descrito.

Figura 3.16 – Procedimento do método utilizado para adsorção de íons de alumínio e ferro



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

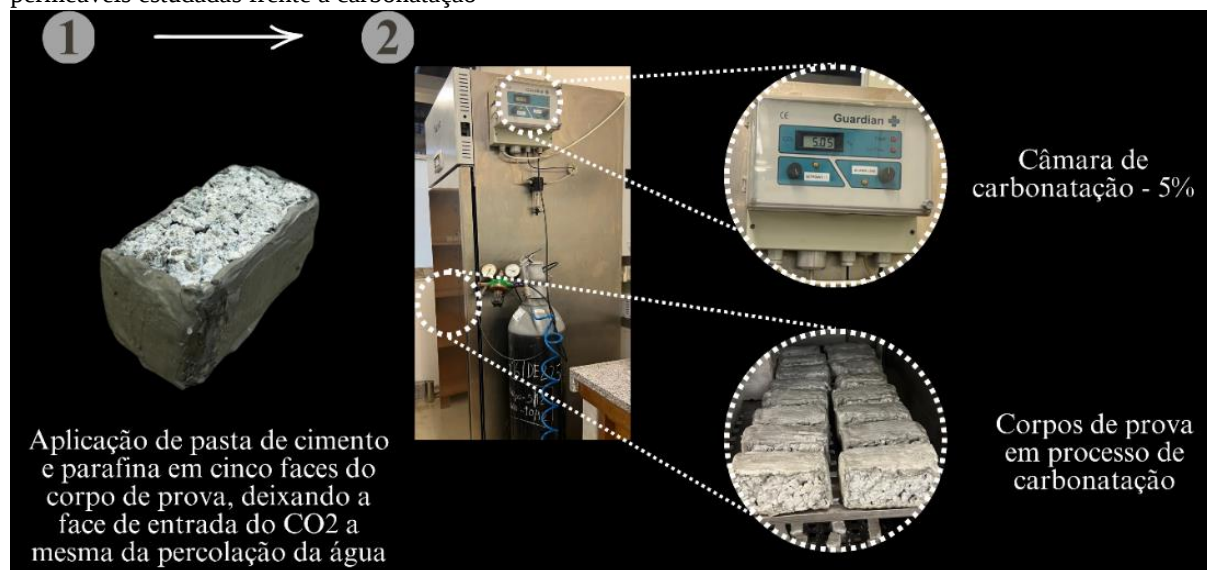
3.4.2.2.4 Durabilidade frente à carbonatação dos concretos permeáveis

A análise da durabilidade frente à carbonatação foi realizada com o objetivo de avaliar a profundidade de avanço do dióxido de carbono (CO_2) no concreto permeável, considerando sua elevada porosidade e conectividade dos vazios. O procedimento experimental foi conduzido em conformidade com as diretrizes estabelecidas na norma TS 12390-12, incluindo os parâmetros de exposição relacionados à concentração de CO_2 , à temperatura e à umidade relativa do ar na câmara de carbonatação (CEN, 2010).

Inicialmente, os corpos de prova, com dimensões de 100 mm $\times$ 50 mm $\times$ 50 mm, foram mantidos em ambiente controlado (temperatura e umidade do ambiente) por um período superior a 15 dias, até a estabilização da umidade interna. Após esse período, todas as faces dos corpos de prova foram recobertas com uma camada de pasta cimentícia e, posteriormente, com parafina, com o intuito de restringir a penetração de CO_2 apenas a uma superfície específica. Manteve-se sem proteção apenas a face correspondente ao sentido preferencial de percolação da água, por onde ocorre também a entrada do dióxido de carbono na câmara de carbonatação, assegurando um fluxo unidirecional, conforme recomendado pela TS 12390-12 (CEN, 2010).

Os corpos de prova foram então submetidos à câmara de carbonatação acelerada, operando com concentração de CO_2 em 5%, temperatura e umidade relativa controladas conforme os limites e recomendações da norma, sendo a avaliação da profundidade de carbonatação realizada aos 1, 3, 7 e 14 dias de exposição. A escolha desses intervalos de análise justifica-se pela elevada porosidade do concreto permeável, que tende a favorecer uma cinética de carbonatação mais rápida quando comparada aos concretos convencionais. Esse método foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, em Portugal. As condições de transportes foram feitas de forma a não danificar os corpos de provas, envolvendo-os em plástico bolha. A Figura 3.17 apresenta o procedimento descrito.

Figura 3.17 – Procedimento do método utilizado para verificar a durabilidade das misturas de concretos permeáveis estudadas frente à carbonatação



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4.2.2.5 Análise estatística

A análise estatística foi realizada nas pastas, considerando os resultados de trabalhabilidade, resistência à flexão e resistência à compressão, e nas misturas de concreto permeável, considerando os resultados de trabalhabilidade, índice de vazios, permeabilidade, resistências mecânicas e adsorção química.

Inicialmente, os dados foram avaliados quanto ao atendimento dos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias, por meio dos testes de *Shapiro–Wilk* e *Levene*, respectivamente. Com base nesses resultados, definiu-se a abordagem estatística a ser adotada.

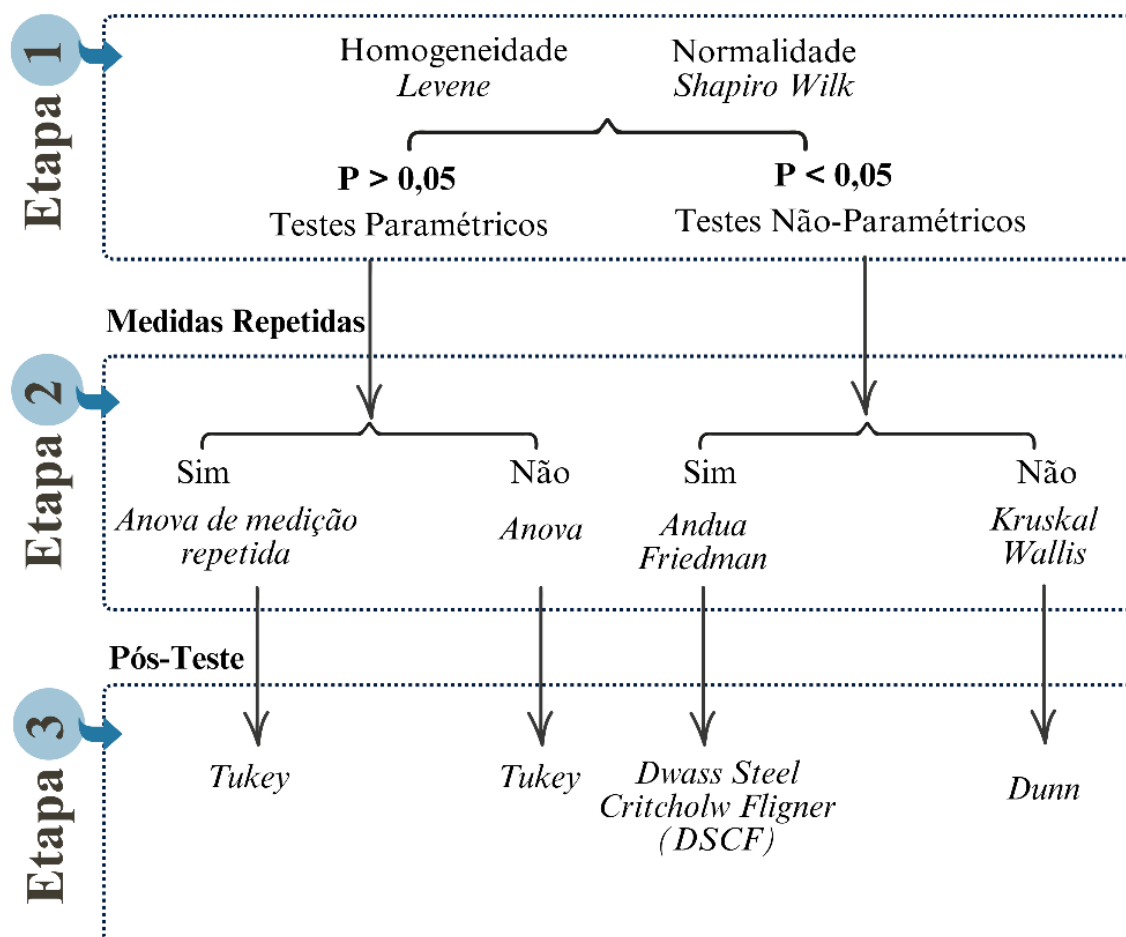
Para dados que atenderam aos pressupostos, foram aplicados testes paramétricos, utilizando-se análise de variância (ANOVA) de uma via para grupos independentes ou ANOVA de medidas repetidas, conforme o delineamento experimental. Quando os pressupostos não foram atendidos, adotaram-se os testes não paramétricos equivalentes, sendo o teste de *Kruskal–Wallis* aplicado para dados independentes e o teste de *Friedman* para medidas repetidas.

Quando identificadas diferenças estatisticamente significativas, foram realizadas comparações múltiplas entre os grupos. Para análises paramétricas, utilizou-se o teste de *Tukey*, enquanto para análises não paramétricas foram empregados os testes de *Dunn* ou *Dwass–Steel–Critchlow–Fligner (DSCF)*.

Em todas as análises, adotou-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$), sendo reportados o valor de F (quando aplicável), o p-valor e o tamanho de efeito (ε^2), permitindo avaliar tanto a significância estatística quanto a magnitude das diferenças observadas.

A Figura 3.18 apresenta o fluxograma da metodologia adotada nessa análise estatística.

Figura 3.18 – Fluxograma das etapas metodológicas da análise estatística



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados e discussões das análises estatísticas encontram-se em cada subitem do Capítulo 4, e os quadros com os respectivos resultados estão apresentados no Apêndice A. A análise estatística foi realizada utilizando o Software Jamovi.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

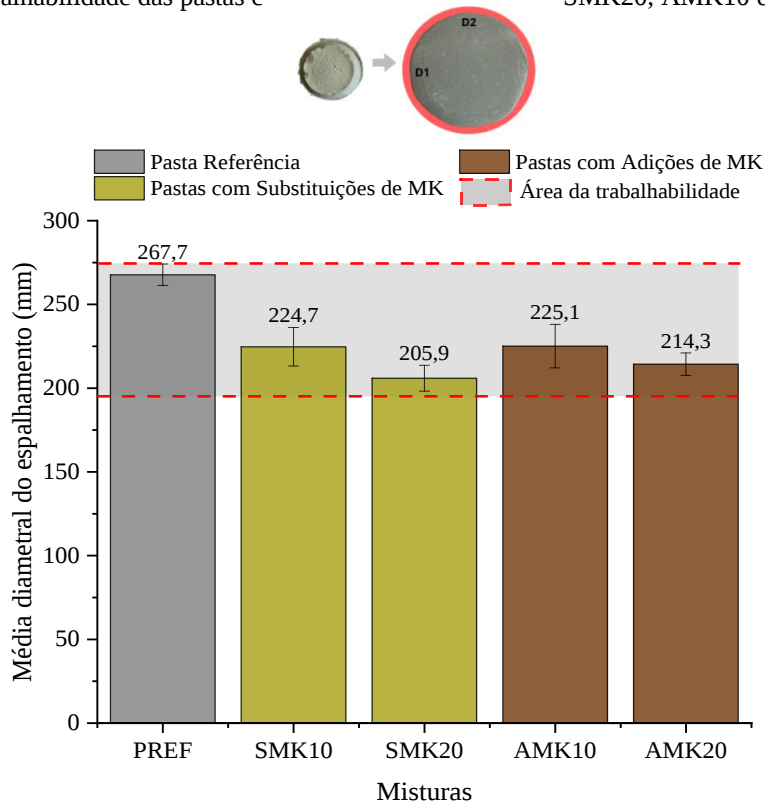
4.2 Pastas cimentícias estudadas

A análise dos resultados das pastas cimentícias referência (PREF), com substituição parcial do cimento por metacaulim (MK) em 10% e 20% (SMK10 e SMK20) e com adição de MK em relação a massa de cimento em 10% e 20% (AMK10 e AMK20) está organizada em duas seções: (i) avaliação do comportamento no estado fresco, por meio da análise da trabalhabilidade, e (ii) avaliação do comportamento no estado endurecido, com ênfase na resistência mecânica à flexão e à compressão.

4.2.1 Estado fresco das pastas cimentícias: trabalhabilidade

A Figura 4.1 apresenta os resultados do ensaio de espalhamento, realizado por meio do *mini slump flow test* das pastas cimentícias produzidas com fator água/finos fixado em 0,30. O objetivo foi avaliar a influência da incorporação do MK, por substituição e por adição, na trabalhabilidade das pastas.

Figura 4.1 – Trabalhabilidade das pastas cimentícias (PREF, SMK10, SMK20, AMK10 e AMK20)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No gráfico apresentado na Figura 4.1, observa-se que a pasta de referência (PREF) apresentou o maior valor médio de espalhamento ($267,7 \text{ mm} \pm 6,4 \text{ mm}$), evidenciando maior fluidez e melhor condição de trabalhabilidade. Esse comportamento é atribuído à menor área superficial específica do sistema e à ausência de partículas finas, resultando em menor demanda de água. Resultado semelhante foi observado por Liu *et al.* (2022), que verificaram que misturas contendo apenas cimento Portland comum, com fator água/cimento de 0,50, apresentaram maiores valores de espalhamento (acima de 120 mm) quando comparadas às misturas contendo metacaulim em teores de substituição de 5% a 20%, as quais apresentaram uma diminuição de até 41% dos espalhamentos, variando entre 70 mm e 120 mm. Entretanto, neste estudo, mesmo utilizando uma relação água/cimento inferior (0,30), os valores de espalhamento foram superiores. Esse comportamento sugere que, além da relação a/c, fatores como a ausência de partículas ultrafinas com elevada área específica exerceram influência determinante na fluidez da pasta.

Ainda na Figura 4.1, é perceptível que tanto a adição quanto a substituição do cimento por MK, nos teores de 10% e 20%, promoveram redução do espalhamento. Nas misturas com substituição parcial do cimento por MK (SMK10 e SMK20), observou-se uma redução progressiva (com o aumento da substituição por MK) do diâmetro médio de espalhamento, com valores de 224,7 mm e 205,9 mm, respectivamente. Esse comportamento está associado ao aumento da área superficial específica das partículas sólidas da pasta cimentícia e à maior finura do MK, conforme evidenciado na análise granulométrica por difração a laser (Figura 4.1), resultando na redução da quantidade de água livre disponível para a mobilidade das partículas (Li *et al.*, 2022).

Nas misturas com adição de MK (AMK10 e AMK20), os valores médios de espalhamento foram de 225,1 mm e 214,3 mm, respectivamente. Embora o aumento do teor de finos tenda a elevar a demanda de água, a manutenção da relação água/finos e do teor integral de cimento contribuiu para mitigar a perda de fluidez quando comparada às misturas obtidas por substituição do MK. Esse resultado indica que a adição de MK, em relação à substituição, quando não há alteração da relação água/finos, tende a preservar a trabalhabilidade da mistura, em concordância com os resultados de Liu *et al.* (2022).

Por meio do teste de normalidade, conforme *Shapiro-Wilk* foi verificado que as misturas SMK10, SMK20 e AMK10 apresentaram distribuição normal. Entretanto, a mistura AMK20 não atendeu ao pressuposto de normalidade. Dessa forma, aplicou-se o teste de *Kruskal-Wallis* (teste não paramétrico global) para comparar os valores de espalhamento entre as diferentes

misturas. O resultado foi estatisticamente significativo ($p < 0,05$), indicando que pelo menos uma mistura difere das demais.

Para identificar quais misturas (grupos) apresentavam diferenças, após o resultado significativo do teste de *Kruskal–Wallis* ($p = 0,029$), aplicou-se o teste de *Dwass–Steel–Critchlow–Fligner* (DSCF), apropriado para comparações múltiplas entre grupos independentes com tamanhos amostrais desiguais. No entanto, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre os pares de grupos analisados ($p > 0,05$ para todas as comparações).

Observou-se que a mistura de referência (PREF), sem adição ou substituição de metacaulim, apresentou maior fluidez. Nos demais grupos, com adição ou substituição de metacaulim (MK), verificou-se uma redução da fluidez, com variações entre os tratamentos. Apesar dessa tendência, o teste DSCF não identificou diferenças estatisticamente significativas entre os pares de misturas ($p > 0,05$).

Por meio da análise de correlação parcial, observou-se que a razão água/finos apresentou correlação estatisticamente significativa e positiva com o espalhamento ($r = 0,497$; $p = 0,022$), refletindo o comportamento esperado para pastas mais fluidas. Além disso, foi observada uma correlação negativa entre a massa de cimento e a fluidez ($r = -0,461$), indicando que maiores teores de cimento tendem a aumentar a viscosidade da pasta; contudo, essa correlação não foi estatisticamente significativa ($p > 0,05$).

O modelo de regressão linear múltipla, baseado na razão água/finos e no teor de MK, apresentou bom ajuste ($R^2 = 67,8\%$; $p < 0,001$) e explicou adequadamente a variabilidade do espalhamento das pastas. A presença do metacaulim exerceu efeito significativo na redução da fluidez. Os pressupostos do modelo indicaram ausência de autocorrelação (Durbin-Watson = 1,93; $p = 0,516$), normalidade aceitável (Shapiro-Wilk, $p = 0,061$) e ausência de multicolinearidade entre as variáveis independentes (VIF = 1,91). Os pressupostos do modelo foram atendidos, e os resultados mostraram-se estatisticamente coerentes com o comportamento esperado.

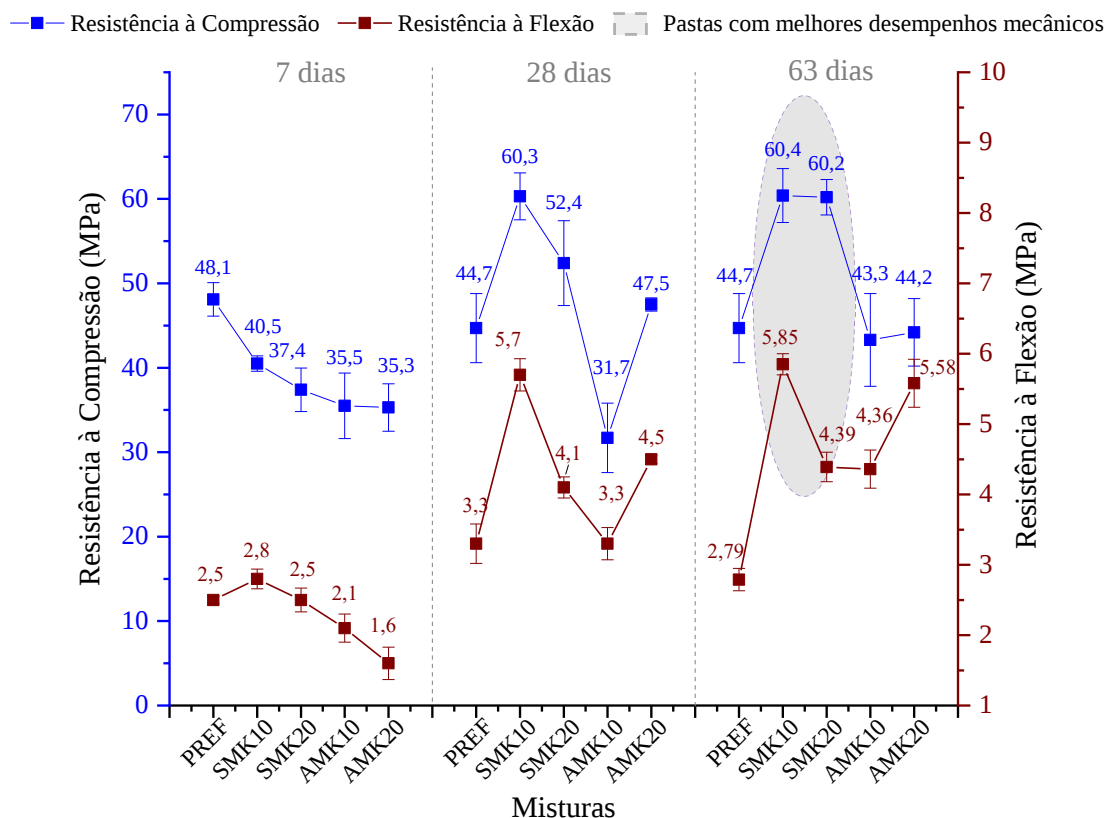
Dessa forma, foi possível concluir os seguintes pontos: (i) a fluidez apresenta correlação negativa com a adição ou substituição de MK ($\rho = -0,614$; $p = 0,002$), reforçando observações empíricas e os resultados do ensaio de *mini slump flow test*; (ii) a relação água/finos, isoladamente, não é suficiente para determinar o espalhamento. Embora a relação água/finos tenha apresentado correlação significativa com o espalhamento ($\rho = -0,508$; $p = 0,016$), a magnitude das correlações observadas para o teor de cimento ($\rho = 0,487$; $p = 0,021$) e,

principalmente, para o teor de metacaulim ($\rho = -0,614$; $p = 0,002$) indica que a fluidez resulta da interação entre múltiplos fatores de composição e (iii) o teor de cimento (CP V-ARI) desempenha papel relevante na fluidez das pastas tanto na análise simples ($\rho = 0,487$; $p = 0,021$) quanto na correlação parcial controlada para o teor de metacaulim ($\rho = -0,461$; $p = 0,035$), sendo que sua redução por substituição tende a diminuir a trabalhabilidade.

4.2.2 Estado endurecido das pastas cimentícias: resistência mecânica à flexão e à compressão

Após a avaliação da trabalhabilidade, procedeu-se à análise do desempenho mecânico das pastas no estado endurecido, por meio dos ensaios de resistência à flexão e à compressão, realizados aos 7, 28 e 63 dias de cura úmida submersa. Essa etapa teve como objetivo compreender a influência das substituições e adições parciais do cimento por metacaulim (MK) e identificar as misturas com melhor desempenho mecânico, as quais foram posteriormente selecionadas para a etapa de produção dos concretos permeáveis. A Figura 4.2 apresenta o gráfico com os resultados mecânicos.

Figura 4.2 – Resistência à compressão e à flexão aos 7, 28 e 63 dias de cura das pastas estudadas (PREF, SMK10, SMK20, AMK10 e AMK20)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

De forma geral, observa-se que as pastas contendo MK apresentaram comportamento mecânico distinto da pasta de referência (PREF), especialmente a partir das idades mais avançadas de cura. Aos 7 dias, a pasta PREF apresentou resistência à compressão entre 16% e 23%, superior em relação às pastas com substituição de MK. Ao ser comparada às pastas com adição de MK, a diferença percentual foi superior a 27%. Essa mesma tendência foi verificada nos ensaios de resistência à flexão, com exceção da pasta SMK10, que apresentou a maior resistência à flexão, com valor de 2,8 MPa. Esse comportamento já era esperado, uma vez que o MK, embora altamente reativo, depende da disponibilidade de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), proveniente da hidratação inicial do cimento, para o desenvolvimento efetivo das reações pozolânicas (Weise *et al.*, 2024; Geu *et al.*, 2025).

Entretanto, a partir dos 28 dias, verifica-se um ganho significativo de resistência nas pastas SMK10 e SMK20, com destaque para a pasta SMK10, que apresentou os maiores valores de resistência à compressão entre todas as misturas, atingindo 60,3 MPa. Aqui deve ser ressaltado que as resistências à compressão deram valores altos devido ao formato dos corpos de prova, que é geralmente aplicado a argamassas e foi adaptado para pastas, conforme os procedimentos de Vieira (2010).

Os resultados de resistência à compressão, aos 7, 28 e 63 dias, foram inicialmente avaliados quanto à normalidade por meio do teste de *Shapiro–Wilk*. De modo geral, os dados apresentaram distribuição normal ($p > 0,05$), permitindo a aplicação de métodos paramétricos.

Aplicou-se a ANOVA de medições repetidas, considerando o tempo como fator intra-sujeito e as misturas PREF, SMK10, SMK20, AMK10 e AMK20 como fator inter-sujeito. O efeito isolado do tempo não foi estatisticamente significativo ($F = 2,24$; $p = 0,114$). No entanto, como a interação entre tempo e mistura foi significativa ($F = 5,58$; $p < 0,001$), a interpretação do efeito do tempo deve ser realizada de forma dependente das misturas, indicando que a evolução da resistência varia conforme o tipo de tratamento.

Pode ser observado que as misturas SMK10 e SMK20 apresentaram tendência de aumento progressivo da resistência com a idade, enquanto as misturas AMK10 e AMK20 exibiram maior variabilidade ao longo do tempo. A mistura de referência (PREF) apresentou comportamento mais estável, sem ganhos expressivos entre as idades avaliadas. Isso pode ser justificado pela ausência do metacaulim na sua mistura, uma vez que estudos como o de Geu *et al.* (2025) demonstram que a substituição parcial do cimento por MK com teores entre 10% e 15%, favorece o desenvolvimento da resistência mecânica devido as reações pozolânicas.

O efeito inter-sujeitos não foi estatisticamente significativo ($F = 0,662$; $p = 0,655$), indicando ausência de diferenças globais entre as misturas quando o fator tempo é desconsiderado. De forma adicional, as comparações *post hoc* entre os tempos não revelaram diferenças estatisticamente significativas ($p > 0,05$), reforçando a elevada dispersão dos resultados de compressão entre idades e misturas.

A análise de regressão linear múltipla, realizada para os resultados aos 63 dias, apresentou ajuste moderado ($R^2 = 23,4\%$; $p = 0,021$). A análise ANOVA do modelo indicou que o teor de água foi o único preditor estatisticamente significativo ($p = 0,028$), exercendo efeito negativo sobre a resistência à compressão. Os teores de cimento e de MK não apresentaram influência estatisticamente significativa ($p > 0,05$), embora tenha sido observada tendência de incremento da resistência nas misturas com teores de substituição de metacaulim em 10% e em 20% (SMK10 e SMK20, respectivamente).

Os testes de verificação dos pressupostos indicaram ausência de autocorrelação relevante (*Durbin–Watson* = 2,43; $p = 0,338$), com normalidade $p = 0,902$ e baixos níveis de colinearidade ($VIF < 3$), confirmando a adequação do modelo estatístico.

Dessa forma, conclui-se que a resistência à compressão é influenciada predominantemente pela interação entre tempo de cura e tipo de mistura, sendo mais sensível à variabilidade do teor de água do que às modificações isoladas nos teores de cimento e metacaulim. Esse resultado é compatível com a Lei de Abrams, segundo a qual a resistência mecânica de uma mistura cimentícia é governada pela relação água/cimento, parâmetro que determina a porosidade da matriz cimentícia e, conseqüentemente, o desempenho mecânico do material (Mehta; Monteiro, 2014).

Os resultados de resistência à flexão também foram maiores para a pasta SMK10, alcançando o valor de 5,7 MPa. Esse desempenho se intensificou aos 63 dias, evidenciando a contribuição das reações pozolânicas tardias, responsáveis pela formação adicional de silicato de cálcio hidratado (C–S–H), o que promove o refinamento da microestrutura e o aumento da densidade da matriz cimentícia (Weise *et al.*, 2024).

Os resultados de resistência à flexão, aos 7, 28 e 63 dias, foram avaliados quanto à normalidade por meio do teste de *Shapiro–Wilk*. Observou-se que, para todas as misturas e idades analisadas, os dados apresentaram distribuição aproximadamente normal ($p > 0,05$), atendendo aos pressupostos para a aplicação de métodos paramétricos.

Dessa forma, aplicou-se a ANOVA de medições repetidas, considerando o tempo como fator intra-sujeito e as misturas como fator inter-sujeito. Os resultados indicaram efeito

estatisticamente significativo do tempo ($F = 109,08$; $p < 0,001$), evidenciando o aumento da resistência à flexão com a idade de cura. Além disso, foi observada interação significativa entre tempo e mistura ($F = 7,16$; $p < 0,001$), indicando que a evolução da resistência ao longo do tempo depende da composição das misturas (substituição ou adição do cimento por metacaulim).

O efeito inter-sujeitos também foi estatisticamente significativo ($F = 55,90$; $p < 0,001$), demonstrando diferenças relevantes de resistência à flexão entre as misturas. As comparações *post hoc* pelo método de *Tukey* revelaram que as misturas com substituição de cimento por metacaulim (SMK10 e SMK20), especialmente SMK10, apresentaram resistências significativamente superior à mistura de referência (PREF) e às misturas com adição (AMK10 e AMK20), sobretudo nas idades mais avançadas.

A análise de regressão linear múltipla, realizada para os resultados aos 63 dias, apresentou bom ajuste ao modelo ($R^2 = 63,0\%$; $p < 0,001$), explicando de forma satisfatória a variabilidade da resistência à flexão. Observou-se que o teor de cimento exerceu efeito estatisticamente significativo e negativo ($p = 0,003$), indicando que a redução do teor de cimento, associada à substituição por metacaulim, contribuiu para o aumento da resistência à flexão, possivelmente em função da intensificação das reações pozolânicas e do refinamento da matriz cimentícia. Os pressupostos do modelo foram atendidos, sem indícios de autocorrelação ou colinearidade relevantes entre os preditores.

Assim, conclui-se que a resistência à flexão é significativamente influenciada tanto pelo tempo de cura quanto pelo tipo de mistura, sendo favorecida pela substituição parcial do cimento por metacaulim, especialmente em idades mais avançadas (Geu *et al.*, 2025). As pastas SMK10 e SMK20 apresentaram os melhores desempenhos mecânicos, motivo pelo qual esses teores de substituição (10% e 20% de MK) foram selecionados para a produção dos concretos permeáveis de referência avaliados na etapa subsequente.

Com base nos resultados obtidos (Figura 27), as pastas SMK10 e SMK20 foram selecionadas para a etapa de confecção das misturas de concretos permeáveis. Essa escolha se justifica pelo desempenho mecânico superior observado, especialmente aos 28 e 63 dias, indicando potencial para a melhoria das propriedades mecânicas dos concretos permeáveis, particularmente na interface pasta/agregado. Além disso, a substituição parcial do cimento por MK contribui para a redução do consumo de cimento nas misturas, podendo favorecer os aspectos de sustentabilidade do material.

4.3 Propriedades nos estados fresco e endurecido das misturas referências de concretos permeáveis

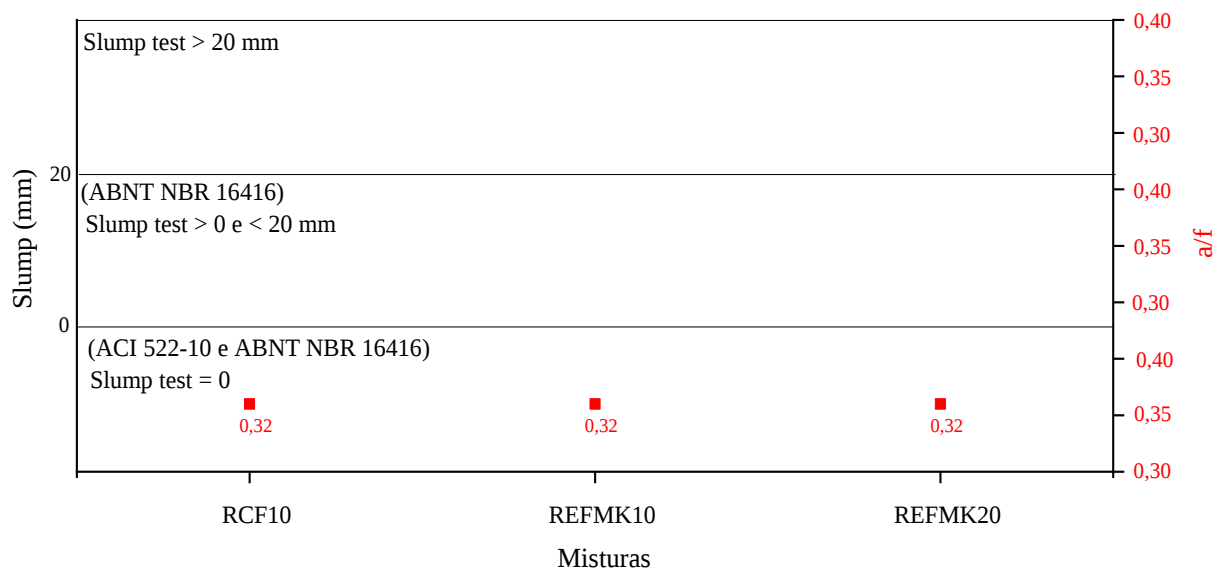
As misturas avaliadas continham 0% (REF), 10% (REFMK10) e 20% (REFMK20) de metacaulim em substituição à massa de cimento (composições das pastas com melhores resultados mecânicos). Além da otimização do desempenho mecânico, a formulação dessas misturas teve o objetivo de reduzir o consumo de cimento Portland e, consequentemente, as emissões de CO₂, considerando que concretos permeáveis frequentemente apresentam teores elevados de cimento. Estudos recentes relatam consumos variando entre 294 e 505 kg/m³ (Chen *et al.*, 2024b) e até 547 kg/m³ (Sha *et al.*, 2024).

A incorporação de pozolanas também pode aprimorar a matriz pasta/agregado gráudo; isso foi evidenciado por Delnavaz *et al.* (2024), que observaram melhor desempenho com substituições de 10% por cinzas volantes e escória, e por Liu *et al.* (2019), cujas misturas contendo 9% de sílica ativa apresentaram resultados superiores à referência.

A trabalhabilidade das misturas contendo RCF e RCG foi avaliada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, com o objetivo de determinar a consistência das composições e verificar sua conformidade com os limites estabelecidos pela 522R-10 (ACI, 2010) e pela NBR 16416 (ABNT, 2015). De acordo com essas normas, o abatimento para concretos permeáveis deve situar-se entre 0 e 20 mm, sendo comum a ocorrência de zero *slump*. Essa condição é típica em razão do baixo teor de finos, da elevada rigidez granular e da necessidade de preservar grandes volumes de vazios interconectados, essenciais para garantir a permeabilidade do material (Nazeer *et al.*, 2023).

A Figura 4.3 apresenta os resultados de trabalhabilidade das misturas de referência com e sem metacaulim (REF, REFMK10 e REFMK20).

Figura 4.3 – Trabalhabilidade das misturas de concretos permeáveis de referência e seus limites segundo 522R-06 (ACI, 2010) e NBR 16416 (ABNT, 2015)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

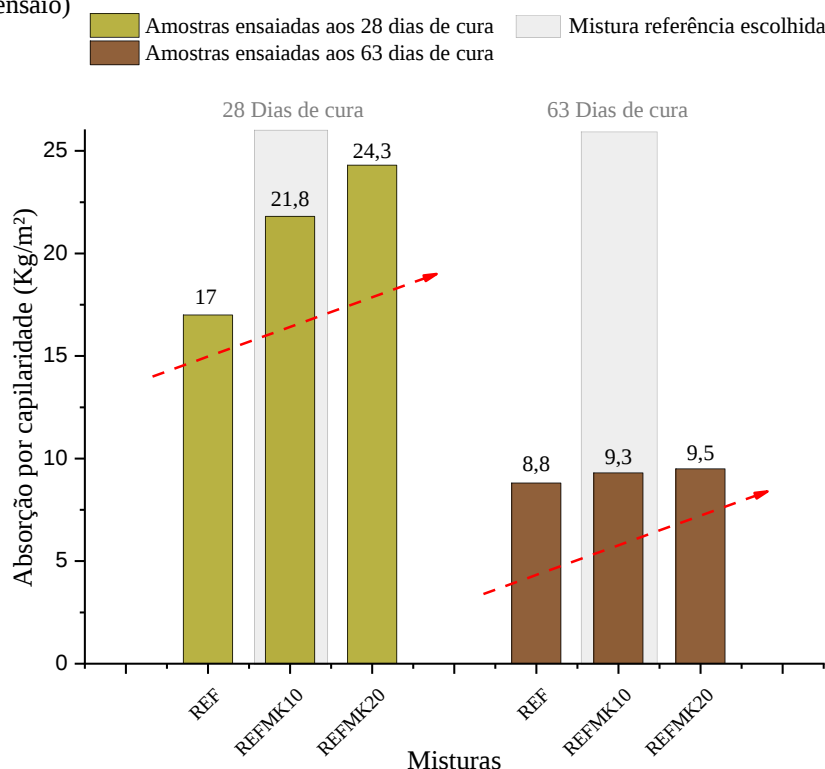
Como apresentado na Figura 4.3, todas as misturas apresentaram zero *slump*, enquadrando-se dentro dos limites normativos e confirmando o comportamento esperado para concretos permeáveis conforme os requisitos das normas 522R-10 (ACI, 2010) e NBR 16416 (ABNT, 2015). Além disso, a substituição do cimento por teores de 10% e 20% de metacaulim não afetou o fator água/finos, mantendo a coesão das misturas.

Diante da ausência de dispersão dos dados e da inexistência de diferenças entre as médias, a aplicação de análise estatística inferencial, como a análise de variância (ANOVA), torna-se metodologicamente desnecessária, uma vez que esse tipo de teste tem por finalidade identificar diferenças estatisticamente significativas entre grupos.

As propriedades físicas dos concretos permeáveis de referência foram avaliadas em dois aspectos: absorção por capilaridade e porosidade pela análise quantitativa do índice de vazios e pela análise de imagens 2D.

A Figura 4.4 apresenta os resultados de absorção de água por capilaridade no 7º dia de ensaio das misturas de concreto permeável REF, REFMK10 e REFMK20, avaliadas aos 28 e 63 dias de cura.

Figura 4.4 – Absorção de água por capilaridade nas misturas de concretos permeáveis de referências (análise final no 7º dia de ensaio)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado com o objetivo de caracterizar a matriz cimentícia, sendo interpretado como um indicador complementar da microestrutura do material. A capacidade drenante dos concretos foi avaliada exclusivamente pelos ensaios de permeabilidade.

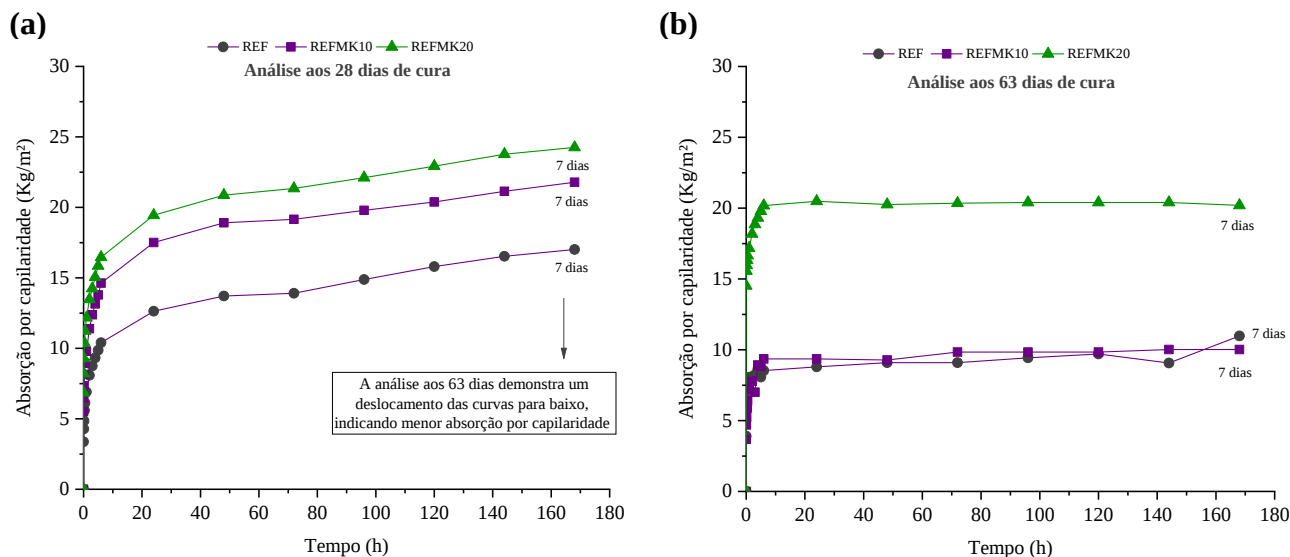
Observa-se que a absorção por capilaridade diminuiu ao longo do tempo de cura, refletindo o contínuo endurecimento da pasta, decorrente da hidratação do cimento (REF) e das reações pozolânicas (REFMK10 e REFMK20) na matriz cimentícia, o que pode resultar na maior densidade da pasta que envolve os agregados e, conseqüentemente, no fechamento parcial dos poros capilares (Boakye & Khorami, 2023).

Ainda no gráfico da Figura 4.4, percebe-se que o incremento de metacaulim (10% e 20%) resultou em maiores valores de absorção aos 28 dias (entre 39% e 51% em relação aos 63 dias), possivelmente pelas reações pozolânicas ainda não terem ocorrido completamente na

microestrutura inicial da pasta. No entanto, aos 63 dias, todas as misturas apresentaram valores muito próximos entre si (8,8 – 9,5 kg/m²), indicando que a reação pozolânica do metacaulim pode ter contribuído para o refino gradual da porosidade e a estabilização da absorção ao longo do tempo. Boakye & Khorami (2023) acrescentam que, em misturas de concretos permeáveis contendo teores de argila calcinada variando de 5% a 30%, a utilização desses finos pode contribuir para o aumento da densidade da mistura de concreto permeável. Isso pode decorrer das reações pozolânicas ou das partículas finas da argila calcinada, que provavelmente ocupam alguns dos poros na mistura de concreto.

Segundo Ximenes (2024), a presença da maior quantidade de partículas menores nas misturas de concretos permeáveis pode potencializar a formação de pequenos poros, contribuindo para o aumento da absorção por capilaridade. Isso pode justificar o fato de a absorção por capilaridade ter sido maior em misturas com maiores teores de MK (SMK20). A Figura 4.5 apresenta a evolução da absorção por capilaridade no decorrer das medições para as análises aos 28 e 63 dias.

Figura 4.5 – Desenvolvimento no tempo da absorção de água por capilaridade das misturas de concretos permeáveis de referência em diferentes idades de cura: (a) 28 dias e (b) 63 dias

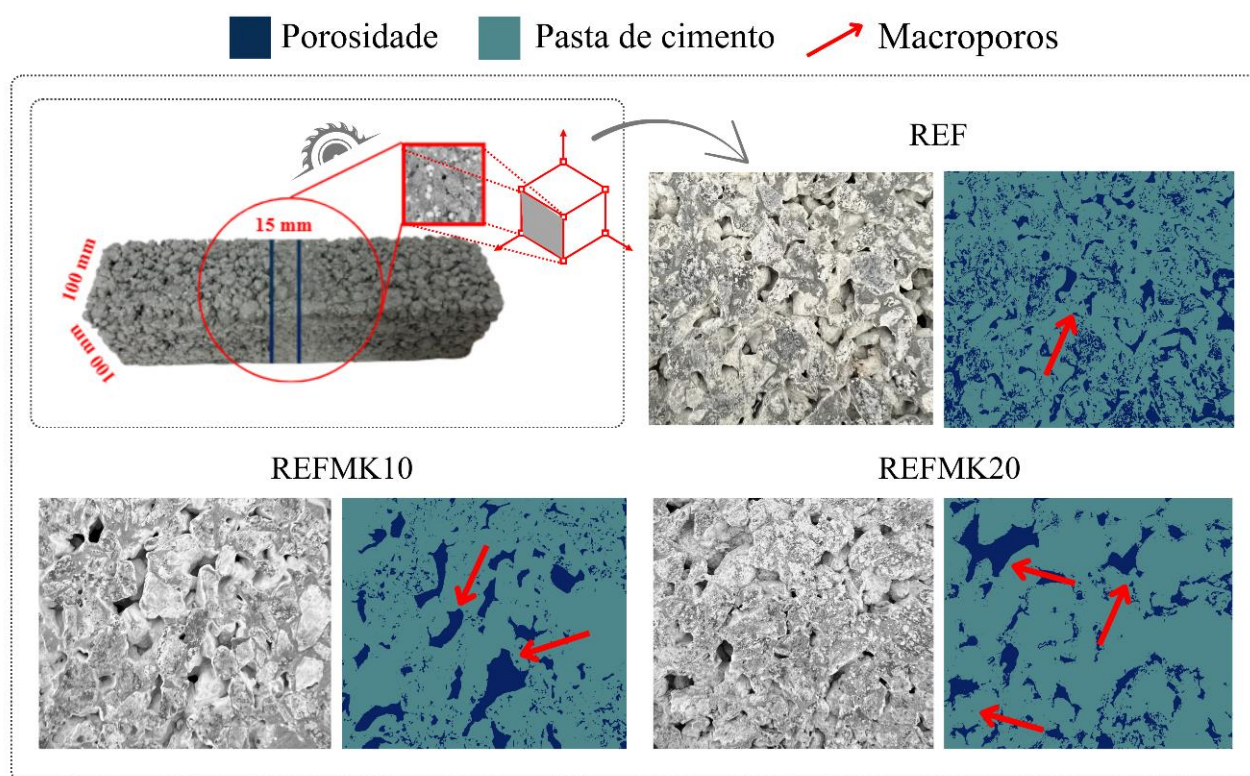


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A porosidade dos concretos permeáveis de referência foi também avaliada de forma qualitativa, por meio de imagens geradas pela linguagem de programação Python, e de forma quantitativa por meio do ensaio de índice de vazios, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005). A Figura 4.6 apresenta as imagens em 2D dos cortes transversais das amostras anteriormente

ensaiadas à tração na flexão, referentes às misturas REF, REFMK10 e REFMK20. A análise qualitativa evidencia a presença de macroporos bem distribuídos e interconectados, quando visto em uma perspectiva tridimensional, responsáveis pela permeabilidade hidráulica, com maiores incidências nas mistura REF, que não possui MK, que podem potencializar a densificação da pasta cimentícia por meio das reações pozolânicas (Sha *et al.*, 2024; Shan *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2020).

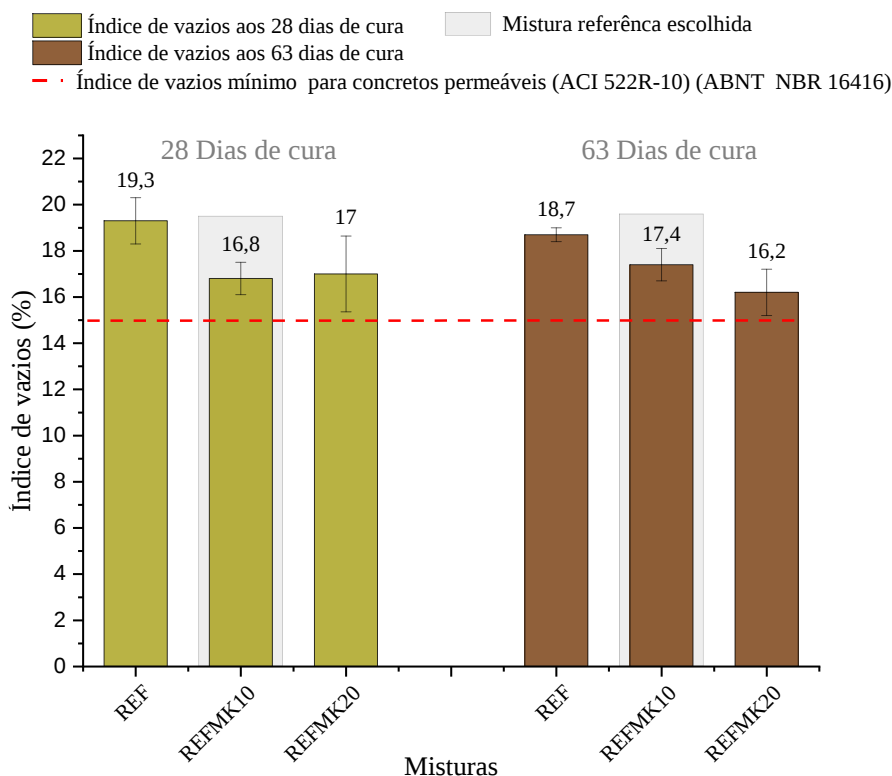
Figura 4.6 – Imagens 2D dos cortes transversais das misturas dos concretos permeáveis: referências (REF, REFMK10, REFMK20)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 4.6 apresenta os resultados do índice de vazios, aos 28 e 63 dias, para as amostras REF, REFMK10 e REFMK20. Observa-se que os valores encontrados conforme os procedimentos descritos na NBR 9778 (ABNT, 2005) superaram o limite mínimo de porosidade recomendado pela 522R-10 (ACI, 2010) e pela NBR 16416 (ABNT, 2015), confirmando o comportamento esperado para concretos permeáveis.

Figura 4.7 – Índice de vazios das misturas dos concretos permeáveis, referências (REF, REFMK10 e REFMK20) por meio experimental



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise do gráfico apresentado na Figura 4.7 indica que, ao se considerar os diferentes tempos de cura, o índice de vazios apresentou as seguintes variações: para a mistura REF, redução de 19,3% para 18,7%; para a REFMK10, passou de 16,8% para 17,45%; e para a mistura REFMK20, passou de 17% para 16,2%. Essa diferença pode ser atribuída às alterações microestruturais associadas à hidratação tardia e às reações pozolânicas podem exercer influência limitada em relação ao volume total de vazios. Nessa perspectiva, os resultados quantitativos indicam que o volume de vazios é predominantemente governado pelo arranjo granulométrico interno, sendo menos sensível às variações no teor de MK. Esse comportamento está em consonância com os resultados encontrados por Kim *et al.* (2019), que avaliaram as propriedades físicas e mecânicas de concretos permeáveis contendo 2% de metacaulim e diferentes teores de cinzas volantes (5%, 10%, 15% e 20%), concluindo que as variações de substituições das pozolanas não promoveram alterações significativas no volume de vazios das misturas, isso ocorre devido a pequena quantidade de pasta na mistura de concreto permeável.

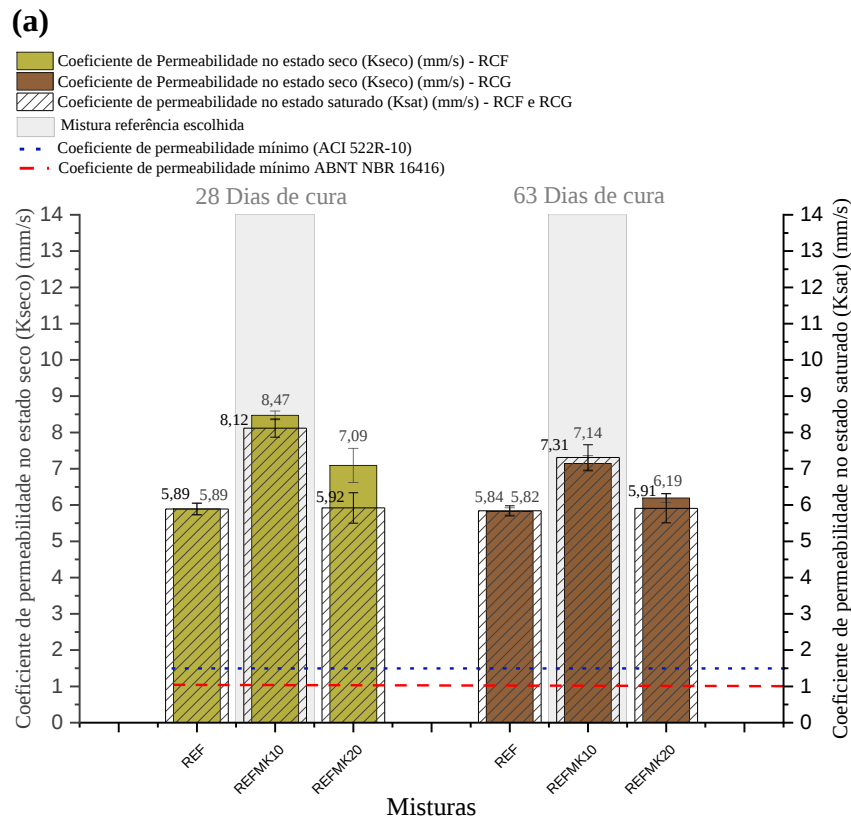
Os resultados experimentais do índice de vazios das misturas de referência foram avaliados estatisticamente pelo teste não paramétrico de *Kruskal–Wallis*. Aos 28 dias, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre as misturas REF, REFMK10

e REF MK20 ($\chi^2(2) = 1,25$; $p = 0,534$; $\varepsilon^2 = 0,114$), indicando comportamento equivalente nessa idade. Em contrapartida, aos 63 dias observou-se efeito significativo do teor de metacaulim ($\chi^2(2) = 7,55$; $p = 0,023$), com elevado tamanho de efeito ($\varepsilon^2 = 0,686$). As comparações múltiplas pelo método *Dwass–Steel–Critchlow–Fligner* indicaram diferença apenas entre as misturas REF MK10 e REF MK20 ($p = 0,045$), não sendo constatadas diferenças nos demais pares ($p > 0,05$).

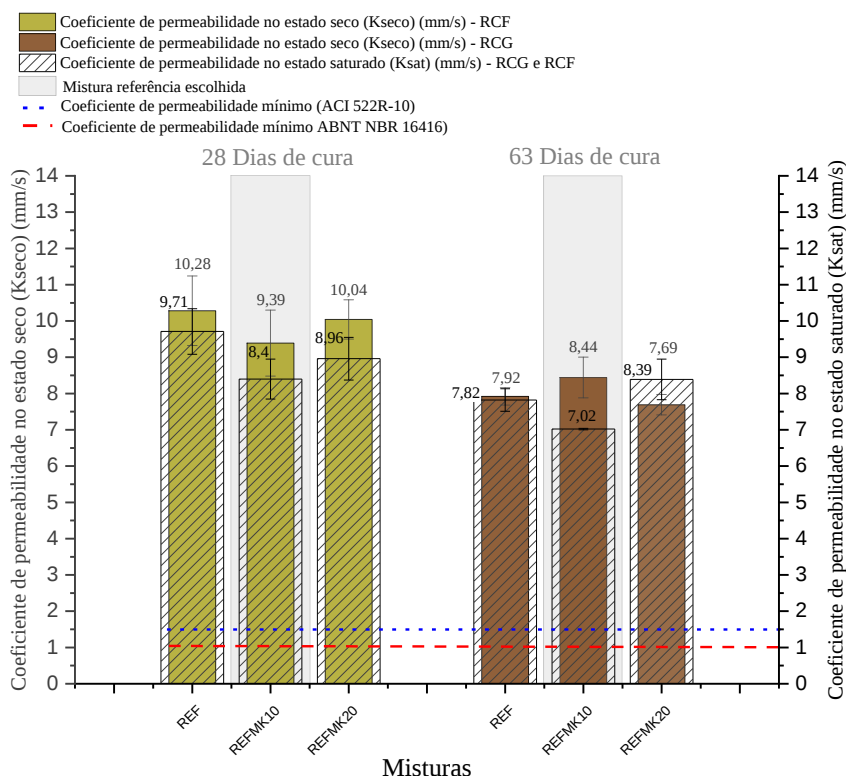
Ainda no âmbito das propriedades dos concretos permeáveis de referência, foram realizados ensaios hidráulicos por meio dos métodos de carga constante e de carga variável, possibilitando a determinação dos coeficientes de permeabilidade nos estados seco (Kseco) e saturado (Ksat) das misturas analisadas.

A Figura 4.8a apresenta os resultados do coeficiente de permeabilidade obtidos pelo ensaio de carga constante, enquanto a Figura 4.8b reúne os resultados referentes ao ensaio de carga variável.

Figura 4.8 – Coeficiente de permeabilidade das misturas de concretos permeáveis de referência nos estados saturado seco e saturado: (a) ensaio à carga constante e (b) ensaio à carga variável



(b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observa-se que os valores obtidos em ambos os métodos não apresentam uma correlação linear, o que pode ser atribuído às particularidades operacionais de cada ensaio. O ensaio à carga constante permite maior controle da vazão e da massa de água que percola pelos vazios do concreto permeável, ao passo que o ensaio à carga variável não oferece o mesmo nível de controle durante a realização do teste.

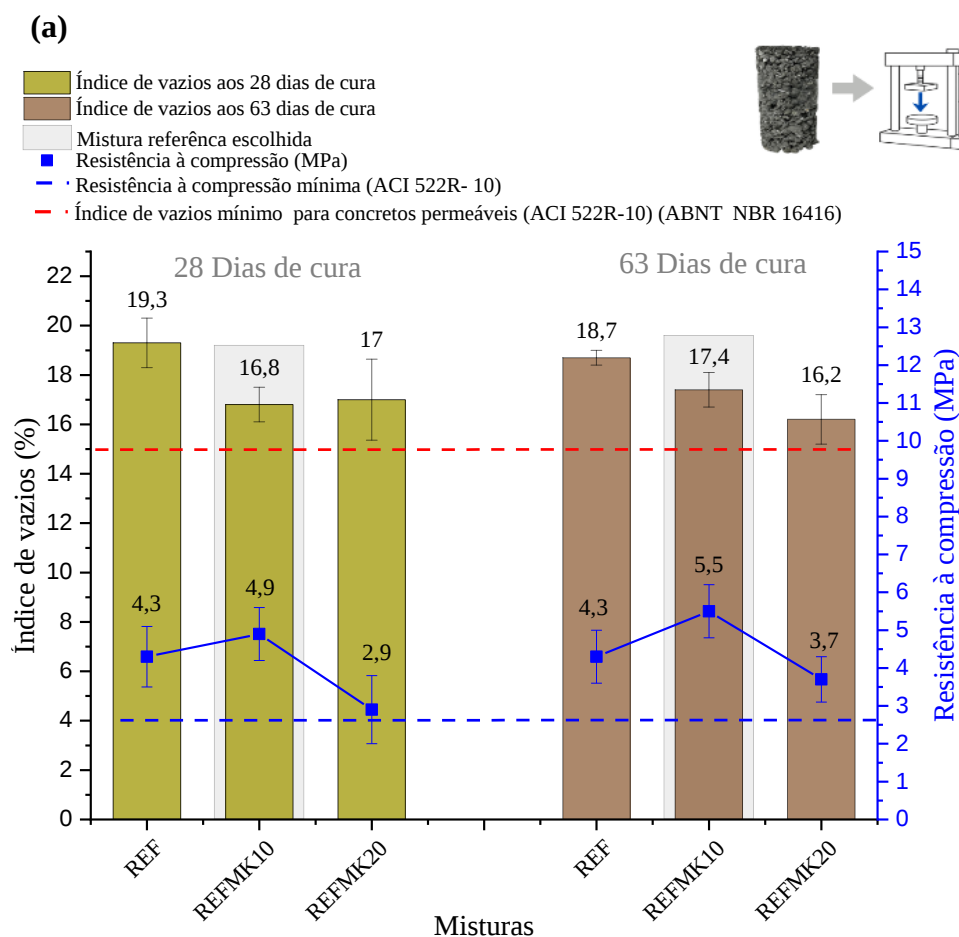
Comportamento semelhante foi observado no estudo de Ximenes (2024), que aplicou ambos os métodos em concretos permeáveis contendo diferentes teores de resíduo da construção e demolição (RCD), evidenciando a influência do método de ensaio na variabilidade dos coeficientes de permeabilidade obtidos.

Ainda na Figura 4.8, observa-se que, ao comparar os coeficientes de permeabilidade nos estados seco e saturado, ocorreu a manutenção ou uma redução acentuada dos valores obtidos. Essa redução está diretamente relacionada ao preenchimento parcial dos vazios pelas moléculas de água nas amostras saturadas, o que dificulta o escoamento e reduz a taxa de fluxo (Seifeddine *et al.*, 2023). Além disso, todas as misturas para as diferentes análises realizadas, apresentaram desempenho hidráulico superior aos valores mínimos recomendados para concretos

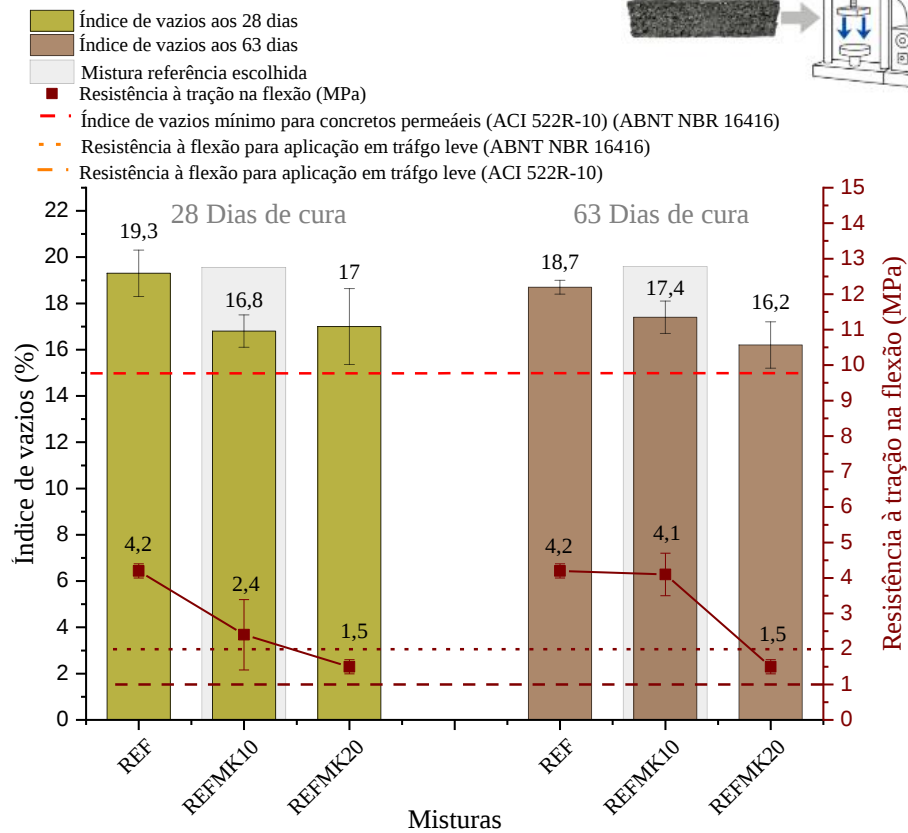
permeáveis, conforme estabelecido pela 522R-10 (ACI, 2010) e pela ABNT NBR 16416 (2015).

A Figura 4.9 apresenta as relações entre porosidade (%), resistência à compressão (MPa) (Figura 4.9a), resistência à tração na flexão (MPa) (Figura 4.9b) e perda de massa por abrasão (Figura 4.9c) das misturas REF, REFMK10 e REFMK20 aos 28 e 63 dias, permitindo avaliar a evolução das propriedades físicas e mecânicas e o efeito da substituição por MK. As linhas tracejadas indicam os valores mínimos recomendados segundo a 522R-10 (ACI, 2010) e a NBR 16416 (ABNT, 2015).

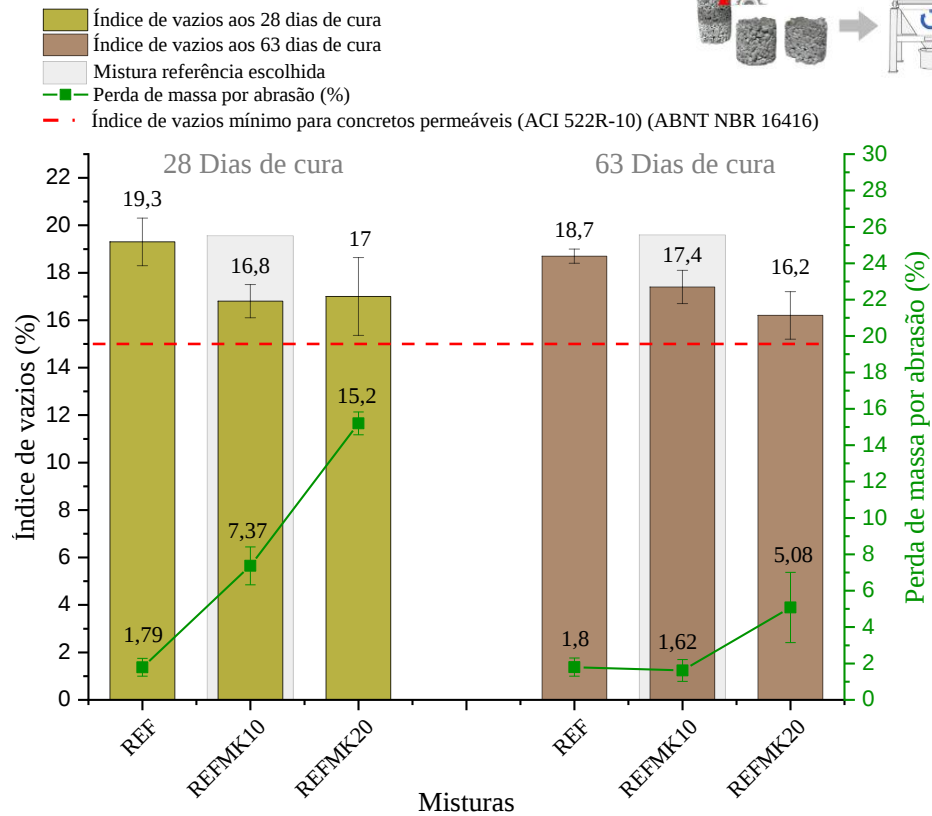
Figura 4.9 – Resultados das misturas de referência quanto a: (a) correlação entre porosidade e resistência à compressão; (b) correlação entre porosidade e resistência à tração na flexão; (c) correlação entre porosidade e perda de massa por abrasão



(b)



(c)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise do índice de vazios entre 28 e 63 dias evidencia que ocorreram variações dentro do desvio padrão. Observa-se uma leve redução da porosidade nas misturas com presença de MK (REFMK10 e REFMK20), mantendo-se, contudo, dentro da faixa recomendada para pavimentos de tráfego leve conforme 522R-06 (ACI, 2010) e NBR 16416 (ABNT, 2015). Essa redução está associada ao refinamento microestrutural promovido pela reação pozolânica e ao melhor empacotamento das partículas (Mohammed *et al.*, 2016).

Os valores de resistência mecânica (Figuras 4.9a e 4.9b) apresentaram diferenças significativas entre as misturas avaliadas, evidenciando a influência da incorporação de metacaulim no desempenho mecânico das pastas. De modo geral, observou-se aumento das resistências com o avanço da idade de cura, sobretudo para as misturas contendo substituição parcial do cimento. Entre as composições analisadas, a mistura MK10 apresentou os melhores resultados mecânicos, alcançando resistência à compressão de 4,9 MPa e resistência à tração na flexão de 2,4 MPa aos 28 dias, evoluindo para 5,5 MPa e 4,1 MPa aos 63 dias, respectivamente. Resultados semelhantes foram relatados por Jindal e Ransinchung (2022), que observaram aumentos de 15 a 25% em misturas com substituição de cimento Portland por cinzas volantes, casca de arroz e bagaço de cana-de-açúcar. De forma complementar, Schackow *et al.* (2020) constataram que a substituição de 10% de cimento Portland por resíduos da indústria de papel resultou em valores de resistência à flexão entre 2,18 e 2,42 MPa, aos 28 dias de cura, valores inferiores aos do resultado da mistura REFMK10 (4,1 MPa).

As resistências à compressão e à tração na flexão foram analisadas estatisticamente pelo teste de *Kruskal–Wallis*. Para as resistências à compressão, verificou-se influência significativa do teor de metacaulim aos 28 dias ($\chi^2(2) = 9,27$; $p = 0,010$; $\varepsilon^2 = 0,843$) e aos 63 dias ($\chi^2(2) = 7,42$; $p = 0,024$; $\varepsilon^2 = 0,675$), ambas com tamanhos de efeito elevados. Comportamento semelhante foi observado para as resistências à tração na flexão, que apresentaram diferenças significativas entre as composições aos 28 dias ($\chi^2(2) = 9,30$; $p = 0,010$; $\varepsilon^2 = 0,846$) e aos 63 dias ($\chi^2(2) = 6,62$; $p = 0,037$; $\varepsilon^2 = 0,601$). Apesar disso, as comparações múltiplas não indicaram diferenças significativas entre os pares de misturas ($p > 0,05$), sendo observadas apenas tendências de diferenciação entre a mistura de referência e aquelas com substituição por metacaulim.

Na Figura 4.9c, são apresentados os resultados de perda de massa por abrasão. Observa-se que, aos 28 dias, as misturas com substituição de cimento Portland por metacaulim exibiram perdas de massa superiores ao serem comparadas com a mistura REF (três vezes maiores para a REFMK10 e até sete vezes maiores para a REFMK20). Contudo, após 63 dias de cura, as

misturas REFMK10 e REFMK20 apresentaram reduções na perda de massa por abrasão de 78% para a REFMK10 e 67% para a REFMK20, em relação aos respectivos valores obtidos aos 28 dias. A mistura REF, por sua vez, manteve-se praticamente inalterada. Esse comportamento reforça o efeito benéfico das reações pozolânicas na melhoria da interface pasta/agregado graúdo ao longo do tempo. Destaca-se, ainda, que a mistura REFMK10 apresentou o menor índice de perda de massa por abrasão (considerando 28 e 63 dias), confirmando os achados de Silva *et al.* (2019), que reportaram redução de desgaste abrasivo com a incorporação de 10% de metacaulim industrial em concretos permeáveis.

A resistência à abrasão não apresentou diferenças estatisticamente significativas entre as misturas, tanto aos 28 dias ($\chi^2(2) = 3,23$; $p = 0,199$; $\varepsilon^2 = 0,294$) quanto aos 63 dias ($\chi^2(2) = 0,15$; $p = 0,926$; $\varepsilon^2 = 0,014$). A análise de correlação de *Spearman* revelou associações significativas entre as propriedades físicas e mecânicas, evidenciando a interdependência entre resistência, índice de vazios e comportamento à abrasão.

As misturas com menor volume de vazios e com substituições de até 10% (REFMK10) tendem a apresentar maiores valores de resistência mecânica aos 63 dias (5,5 MPa para compressão e 4,1 MPa à tração na flexão). Já a mistura com teor de 20% de MK (REFMK20) apresentou 40% a menos na resistência à compressão e 63% a menos na resistência à tração na flexão, em relação aos valores máximos observados na mistura REFMK10.

Os resultados indicam associação entre as resistências à compressão e à tração na flexão, bem como relação inversa dessas propriedades com o índice de vazios em idades mais avançadas. A resistência à abrasão mostrou dependência do desempenho mecânico principalmente em idades iniciais, tornando-se menos sensível às variações microestruturais com o avanço da cura. Os resultados reforçam que, em concretos permeáveis, o papel do metacaulim no incremento da resistência mecânica é secundário diante da influência da estrutura interna dominada pelos macroporos, formados entre os agregados e a pasta cimentícia, cujo comportamento é determinado pelo seu arranjo e empacotamento (Chen *et al.*, 2024b; Li *et al.*, 2023a).

Com base nesse conjunto de resultados, a mistura REFMK10 obteve melhor desempenho mecânico, sendo selecionada como referência para as etapas subsequentes, que incluíram a incorporação do RCF e do RCG, separadamente, em teores de 10% a 40%. A introdução desses resíduos objetivou principalmente por sua característica adsorativa, além de promover a economia circular, além de buscar o melhoramento do empacotamento e, assim, a

potencialização do desempenho mecânico e a ampliação da capacidade adsortiva do concreto permeável, especialmente no que se refere à adsorção de metais presentes na *first flush*.

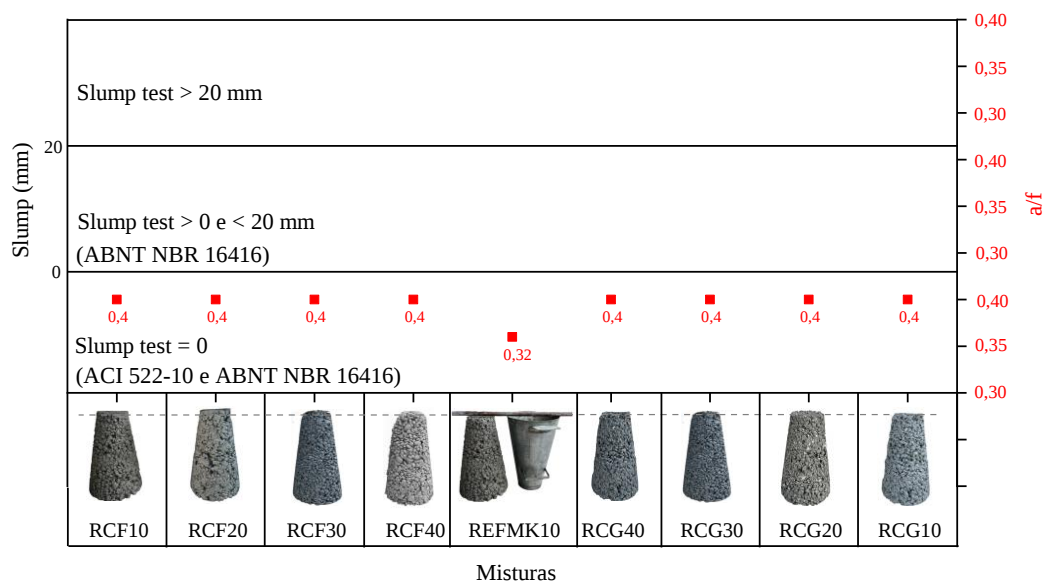
4.4 Avaliação das misturas de concretos permeáveis contendo RCF e RCG

Foram analisados os resultados referentes à trabalhabilidade, bem como às propriedades físicas, hidráulicas, mecânicas, adsortivas e de durabilidade das misturas estudadas (RCF 10-40, RCG 10-40). Adicionalmente, procedeu-se à verificação da significância estatística (ANOVA) dos resultados de trabalhabilidade, porosidade, permeabilidade e resistência mecânica.

4.4.1 Trabalhabilidade

A Figura 4.10 apresenta os resultados de trabalhabilidade obtidos para a mistura de referência com metacaulim (REFMK10), bem como para as misturas contendo metacaulim e resíduo de caulim fino (10RCF, 20RCF, 30RCF e 40RCF) e metacaulim e resíduo de caulim grosso (10RCG, 20RCG, 30RCG e 40RCG). O eixo vertical à esquerda representa os limites de variação do *slump* definidos pela 522R-10 (ACI, 2010) e pela NBR 16416 (ABNT, 2015). O eixo vertical à direita apresenta a variação do fator água/finos (0,30–0,40), enquanto o eixo horizontal discrimina as diferentes misturas avaliadas com as imagens dos concretos permeáveis estudados.

Figura 4.10 – Trabalhabilidade das misturas dos concretos permeáveis de referência, com RCF e RCG e seus limites conforme a norma 522R-06 (ACI, 2010) e a NBR 16416 (ABNT, 2015)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 4.10 demonstra que todas as misturas apresentaram zero *slump*, enquadrando-se nos limites normativos e confirmando o comportamento esperado para concretos permeáveis. Esse desempenho foi observado tanto para as misturas contendo resíduos de caulim fino (RCF10, RCF20, RCF30 e RCF40) quanto para aquelas com resíduos de caulim grosso (RCG10, RCG20, RCG30 e RCG40). Este comportamento também foi identificado para as misturas de referência (REF, REF MK10 e REF MK20), demonstrando que a utilização de resíduo de caulim não tem influência neste contexto, apesar do aumento na relação a/f de 0,32 para 0,40.

Os valores de abatimento iguais a zero em todas as misturas, bem como a uniformidade do fator água/finos, indicam que a incorporação dos resíduos, independentemente da granulometria e do teor, não comprometeu a estrutura granular dominante, que continua a governar o comportamento no estado fresco. Esse fato foi evidenciado nas pesquisas de Sherfenaz *et al.* (2025), que verificaram o *slump* de misturas de concretos permeáveis com escória de alto-forno substituindo parcialmente o agregado graúdo.

A mistura REF MK10 manteve um fator água/finos igual a 0,32, valor inferior ao das demais misturas, que foi igual a 0,40. Esse aumento no fator água/finos pode ser atribuído à maior quantidade de finos introduzida pelos resíduos, elevando a demanda de água das

misturas. Ainda assim, o abatimento permaneceu nulo em todas as composições, dentro da faixa recomendada pelas normas 522R-10 (ACI, 2010) e NBR 16416 (ABNT, 2015).

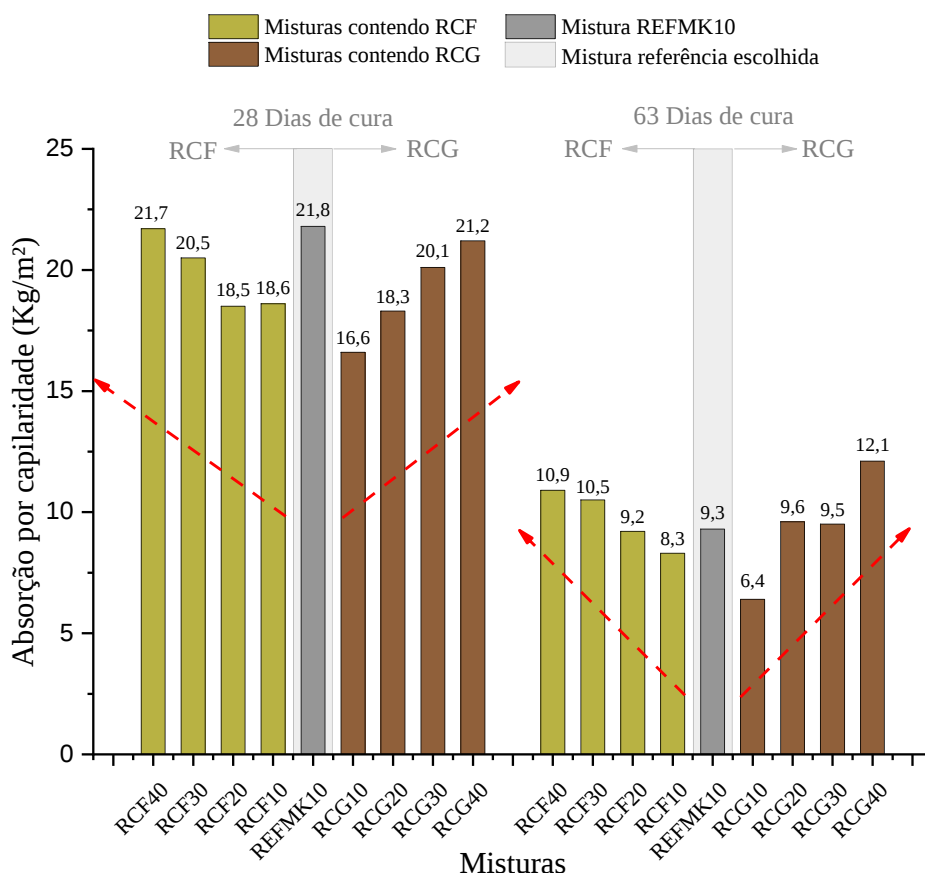
Embora o gráfico apresentado na Figura 4.14 demonstre que, para relações água/finos de 0,32 a 0,40 para as misturas com RCF e RCG, observa-se que, de modo geral, os valores de abatimento não foram modificados. Esse fato pode ser justificável pela presença de fases lamelares residuais, existentes no resíduo de caulim, que pode ter contribuído para o aumento da viscosidade na mistura do concreto permeável.

Os ensaios de trabalhabilidade dos concretos permeáveis indicaram resultados iguais para todas as misturas analisadas, não sendo observada variabilidade entre as repetições. Considerando a inexistência de dispersão dos dados e a equivalência entre os valores médios obtidos, a utilização de métodos estatísticos inferenciais, como a análise de variância (ANOVA), não se justifica do ponto de vista metodológico, uma vez que tais testes têm como objetivo identificar diferenças estatisticamente significativas entre conjuntos de dados distintos.

4.4.2 Absorção por capilaridade

A Figura 4.11 apresenta os resultados de absorção por capilaridade, após 7 dias de ensaio, das misturas de concreto permeável contendo RCF e RCG, avaliadas aos 28 e 63 dias de cura.

Figura 4.11 – Absorção de água por capilaridade nas misturas de concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise final no 7º dia de ensaio)



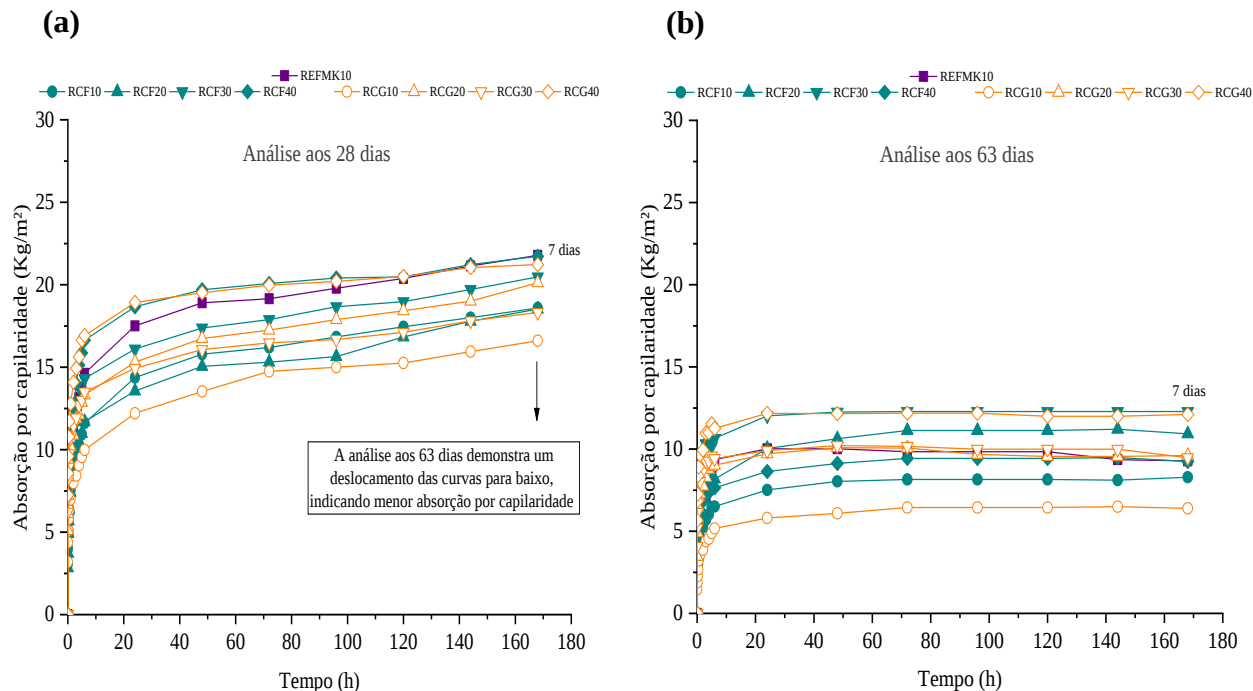
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Ao comparar as idades analisadas, observa-se que a absorção por capilaridade tende a diminuir ao longo do tempo de cura. Essa redução foi da ordem de aproximadamente 43% para a mistura de referência (REFMK10), de cerca de 50% para as misturas contendo RCG e de aproximadamente 57% para as misturas com RCF. Esse comportamento reflete o contínuo endurecimento da pasta cimentícia, decorrente da hidratação do cimento e do avanço das reações pozolânicas na matriz, o que pode resultar no aumento da densidade da pasta que envolve os agregados e, conseqüentemente, no fechamento parcial dos poros capilares (Boakye & Khorami, 2023).

Por outro lado, verifica-se que a absorção por capilaridade aumenta gradativamente com o acréscimo dos teores de RCF e RCG. Em ambos os grupos, esse incremento ocorre de forma progressiva com o aumento do teor de resíduo, sendo observados os menores valores de absorção para as misturas RCF10 e RCG10 e os maiores para as misturas RCF40 e RCG40. Esse aumento na absorção pode estar associado à presença do resíduo incorporado à matriz cimentícia e ao contato com os agregados naturais, cujas características físicas podem favorecer maior absorção de água por capilaridade, possivelmente em função do refinamento da estrutura porosa. Segundo Ximenes (2024), maior quantidade de partículas menores nas misturas de concretos permeáveis pode potencializar a formação de pequenos poros, contribuindo para o aumento da absorção por capilaridade. Adicionalmente, o resíduo de caulim apresenta uma morfologia física que pode potencializar a retenção de água em seu entorno, contribuindo para o aumento da absorção capilar.

A Figura 4.12 apresenta a evolução da absorção por capilaridade no tempo durante os ensaios realizados aos 28 e 63 dias de cura.

Figura 4.12 – Absorção por capilaridade para diferentes tempos de ensaio das misturas de concretos permeáveis contendo RCF e RCG em diferentes idades de ensaio: (a) 28 dias e (b) 63 dias



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Pode ser observado pelas Figuras 4.12 que o comportamento de estabilização da absorção capilar foi semelhante para ambas as idades de cura (ao sétimo dia de ensaio de cada

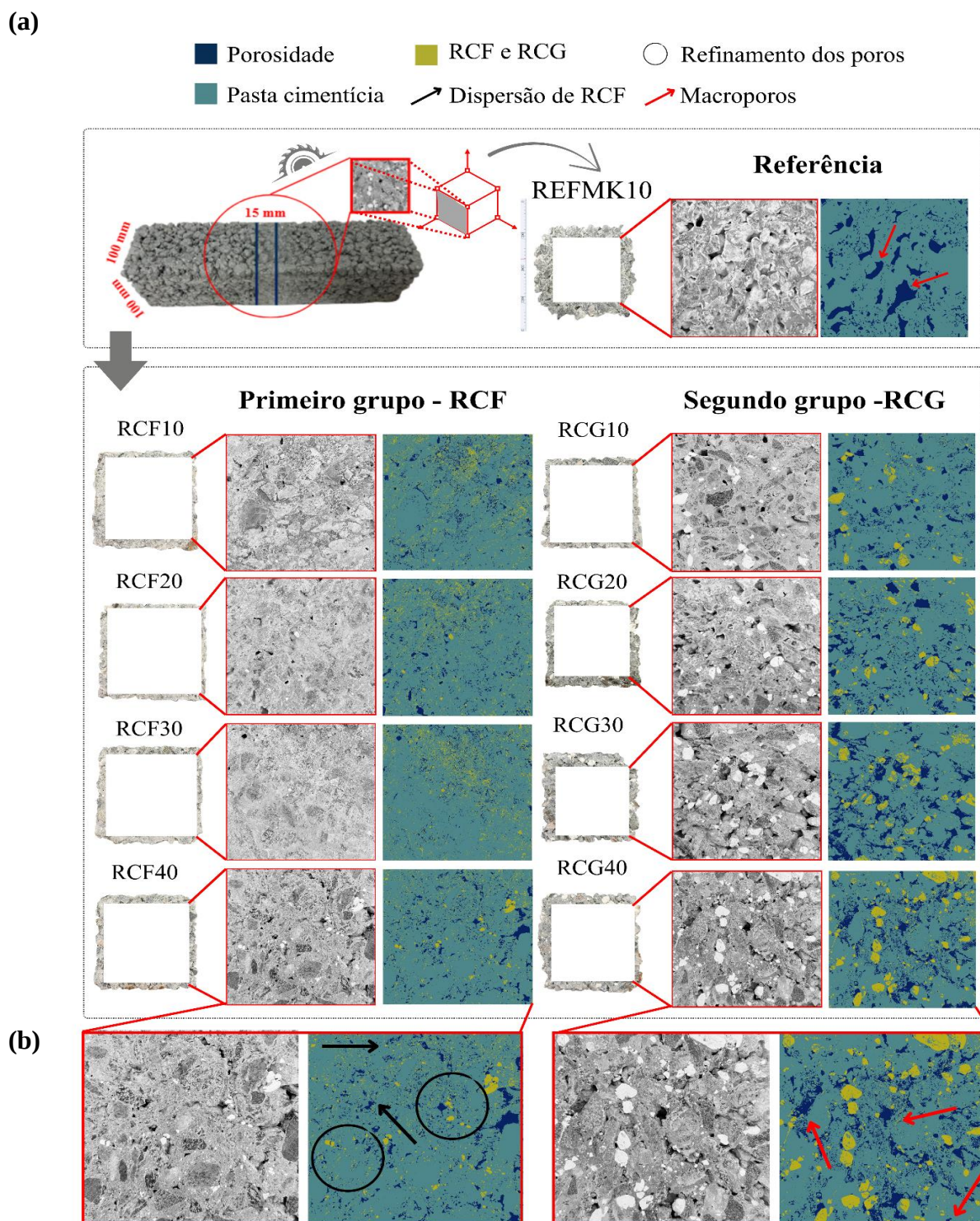
idade). Entretanto, aos 63 dias, as misturas apresentaram menores valores de absorção em comparação aos resultados obtidos aos 28 dias.

Dessa forma, pode ser entendido que esse comportamento pode estar relacionado ao refinamento da matriz cimentícia ao longo da cura, decorrente das reações de hidratação e do efeito pozolânico do MK, promovendo redução da conectividade dos poros capilares da pasta. Adicionalmente entende-se também que os vazios do concreto permeável tendem a permanecer relativamente constante, a diminuição da absorção capilar está possivelmente associada às modificações ocorridas na pasta cimentícia.

4.4.4 Índice de vazios

A Figura 4.13a apresenta as imagens em 2D dos cortes transversais das amostras, após 63 dias de cura, referentes às misturas REFMK10, RCF10 a RCF40 e RCG10 a RCG40. Adicionalmente têm-se na Figura 4.13b as imagens ampliadas das misturas com 40% de resíduo fino e resíduo grosso.

Figura 4.13 – Imagens 2D dos cortes transversais das misturas de concretos permeáveis: (a) imagens das misturas de concreto permeável analisadas; (b) imagem ampliada com representação das áreas com maior densidade, refinamento dos poros e macroporos



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A porosidade dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG foi avaliada de forma qualitativa, por meio de imagens geradas pela linguagem de programação Python (Silva, 2022)

e de forma quantitativa por meio do ensaio de índice de vazios, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005). A análise qualitativa evidencia a presença de macroporos bem distribuídos e interconectados, responsáveis pela permeabilidade hidráulica (Liu *et al.*, 2020; Shan *et al.*, 2022; Sha *et al.*, 2024).

As áreas em branco são relativas à área analisada, visto que os concretos permeáveis possuíam perímetro irregular após o corte. A mistura REFMK10 (Figura 4.13a) apresenta uma matriz cimentícia uniforme, com vazios bem definidos e conectividade preservada, representando o padrão esperado para um concreto permeável convencional com adição de 10% de metacaulim. Esse comportamento serve como referência para avaliar o impacto da adição do RCF e do RCG nas misturas.

Nas misturas do primeiro conjunto (RCF) (Figura 4.13), observa-se que a fração mais fina do resíduo preenche parcialmente os espaços intergranulares, resultando em uma redução discreta no tamanho médio dos vazios visíveis, sem obstruir completamente os caminhos preferenciais de fluxo. Estudos, como os de Rahul e Ravi Kumar (2025), indicam que a proporção ideal de finos em concretos permeáveis é de aproximadamente 8%, de modo a equilibrar permeabilidade e densificação da matriz. Ainda sobre o primeiro conjunto, percebe-se que quando o teor de resíduo aumenta de 10% (RCF10) para 40% (RCF40), nota-se uma maior dispersão do material fino entre os agregados e uma leve densificação da matriz, particularmente nas misturas RCF30 e RCF40. Apesar disso, os macroporos permanecem presentes, ainda que em menor quantidade nas amostras com teores mais elevados. Dessa forma, a incorporação do RCF não compromete a estrutura de poros essencial para o desempenho hidráulico, condição que favorece aplicações que buscam conciliar permeabilidade com maior potencial adsorvente. Isso foi comprovado no ensaio experimental de índice de vazios (ABNT NBR 9778, 2015) e de permeabilidade (ACI 522R-10, 2010).

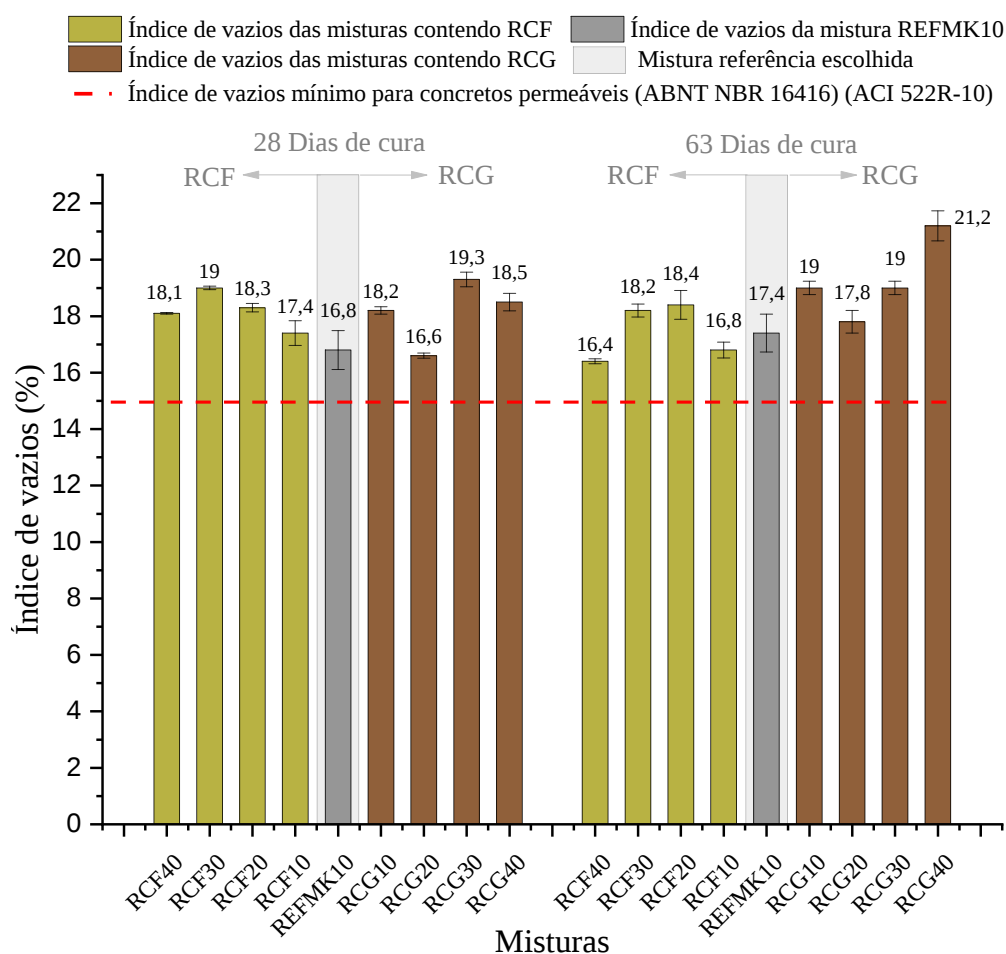
Por outro lado, as misturas do segundo conjunto (RCG) (Figura 4.13) apresentam comportamento distinto. O resíduo de granulometria maior tende a se incorporar ao esqueleto granular sem preencher os interstícios menores, preservando de forma mais evidente os vazios maiores e a interconectividade característica do concreto permeável. À medida que o teor de RCG aumenta, observa-se um incremento na heterogeneidade da distribuição granulométrica e na formação de zonas de contato maiores entre as partículas de resíduo e os agregados graúdos, podendo favorecer a estabilidade da estrutura aberta. Misturas como RCG20 e RCG30 apresentam o equilíbrio mais evidente entre a presença do resíduo e a manutenção dos vazios,

enquanto RCG40 mostra maior preenchimento interno entre os vazios, embora sem perda de conectividade dos poros.

De modo geral, tanto o RCF quanto o RCG preservam a característica porosa do concreto permeável. Entretanto, porcentagens maiores acabam por influenciar o fechamento da conectividade dos poros. O RCF tende a densificar parcialmente a matriz, enquanto o RCG acentua a heterogeneidade granular sem comprometer a rede de macroporos.

A análise quantitativa dos poros do concreto permeável com teores de RCF e RCG está apresentada na Figura 4.14. Observa-se que os valores de volume de vazios determinados pela NBR 9778 (ABNT, 2005) superaram o limite mínimo de porosidade recomendado pela 522R-10 (ACI, 2010) e pela NBR 16416 (ABNT, 2015), confirmando o comportamento esperado para concretos permeáveis.

Figura 4.14 – Índice de vazios (porosidade) das amostras de concreto permeável com RCF e RCG obtidas por meio experimental



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na Figura 4.14, é apresentado que tanto para as idades de 28 dias quanto para 63 dias as misturas contendo RCF apresentaram volume de vazios dentro do desvio padrão da mistura de referência (REFMK10), variando entre 16,4% (RCF40) e 18,4% (RCF20) aos 63 dias, enquanto as misturas com RCG apresentaram valores superiores em relação à referência, entre 17,8% (RCG20) e 21,2% (RCG40). Esse comportamento pode ser atribuído às diferenças na distribuição granulométrica e na morfologia das partículas, quando comparados o RCF e o RCG, conforme evidenciado pela análise qualitativa das imagens 2D. Partículas de granulometria fina tendem a preencher microporos, reduzindo o volume total de vazios, ao passo que partículas mais grossas preservam uma rede de macrovazios interconectados, característica intrínseca ao desempenho hidráulico dos concretos permeáveis (Rahul *et al.*, 2025).

Os dados obtidos pelo procedimento experimental apresentam valores superiores aos mínimos normativos (ACI 522R–10, 2010; ABNT NBR 16416, 2015). A abordagem experimental pode ser complementada pela análise por imagens 2D, que fornece uma descrição qualitativa e espacialmente resolvida da distribuição interna de vazios. O ensaio experimental quantifica o volume total de vazios da amostra, permitindo uma interpretação mais completa do comportamento poroso do material.

Os resultados do índice de vazios foram analisados por meio do teste não paramétrico de *Kruskal–Wallis*. O índice de vazios não apresentou diferenças estatisticamente significativas entre as composições aos 28 dias ($p = 0,111$). Em contrapartida, aos 63 dias, observou-se efeito estatisticamente significativo entre as misturas ($p < 0,05$). As comparações múltiplas realizadas pelo pós-teste *Dwass–Steel–Critchlow–Fligner* não indicaram diferenças significativas entre pares específicos de composições ($p > 0,05$), sugerindo que o efeito observado é de natureza global, sem contrastes marcantes entre misturas individuais.

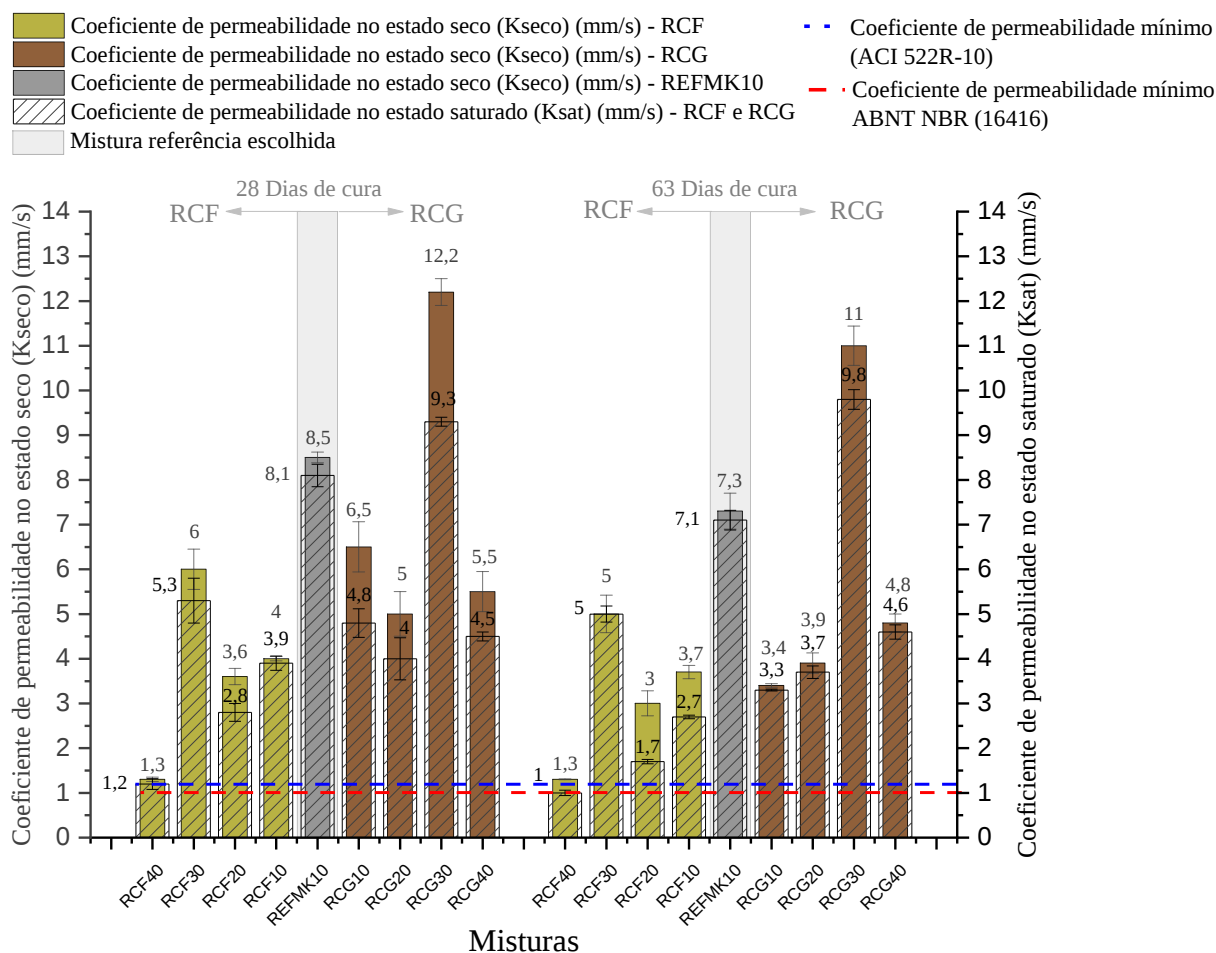
4.4.5 Permeabilidade

Os coeficientes de permeabilidade foram verificados para a carga constante e a carga variável para os estados seco e saturado. Os resultados e discussões estão apresentados a seguir.

Os resultados dos coeficientes de permeabilidade em estado seco (K_{seco}) e saturado (K_{sat}) para carga constante, apresentados na Figura 4.15, evidenciam a influência do grau de saturação, do tipo de resíduo, da granulometria e do teor de adição de RCF e RCG. Todas as misturas apresentaram valores superiores aos limites mínimos estabelecidos pela 522R–10

(ACI, 2010) e pela NBR 16416 (ABNT, 2015), reforçando sua adequação para aplicação como concreto permeável.

Figura 4.15 – Coeficiente de permeabilidade à carga constante para misturas de concretos permeáveis com RCF e RCG para amostras saturadas e não saturadas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Conforme esperado, os valores de Ksat foram inferiores àqueles de Kseco em todas as misturas. Essa redução decorre do preenchimento parcial dos vazios pela água nas amostras saturadas, o que dificulta o escoamento e diminui a taxa de fluxo (Seifeddine *et al.*, 2025).

As misturas contendo RCG apresentaram os maiores coeficientes de permeabilidade, alcançando aproximadamente 12,2 mm/s (Kseco) e 9,3 mm/s (Ksat). Esse desempenho é consistente com o elevado volume de macroporos interconectados previamente identificado nas análises qualitativas e quantitativas de porosidade. Esse contexto foi apresentado por Zhang *et al.* (2020), nos quais a conectividade dos vazios, mais do que o volume total de poros, é o principal parâmetro controlador do fluxo em materiais permeáveis. Ademais, com o aumento do teor de RCG em 30%, Kseco e Ksat apresentaram valores maiores também, evidenciando o

possível papel dos grãos grosseiros como agentes estruturantes na formação de canais drenantes contínuos.

As misturas contendo RCF apresentaram valores de permeabilidade variando de 1,7 a 6 mm/s (Kseco) e de 1,3 a 5,3 mm/s (Ksat). Apesar de permanecerem acima dos requisitos normativos da 522R-10 (ACI, 2010) e da NBR 16416 (ABNT, 2015), apresentaram menor capacidade de fluxo quando comparadas às misturas com RCG e à mistura de referência. Esse comportamento resulta da granulometria mais fina das partículas, que tende a preencher e refinar os vazios maiores, reduzindo a conectividade hidráulica mesmo sob porosidades totais semelhantes. Tal efeito é coerente com o observado por Zhang *et al.* (2022), que descrevem que a presença de materiais finos em concretos permeáveis promove o refinamento dos poros e limita a formação de canais responsáveis pela permeabilidade.

Para a análise dos resultados do coeficiente de permeabilidade sob carga constante, foi aplicada a ANOVA de medições repetidas, considerando-se como fator intra-sujeito a condição de ensaio (seco e saturado) e como fator inter-sujeito a identificação das misturas.

Aos 28 dias, observou-se efeito estatisticamente significativo da condição de ensaio ($F = 96,2$; $p < 0,001$), indicando diferenças relevantes entre os coeficientes de permeabilidade nos estados seco e saturado. A interação entre a condição de ensaio e a identificação das misturas também foi significativa ($F = 39,8$; $p < 0,001$). A partir disso, foi evidenciado que a variação do coeficiente de permeabilidade entre os estados seco e saturado depende da composição do concreto permeável. Adicionalmente, o efeito inter-sujeitos da identificação das misturas apresentou elevada significância estatística ($F = 347$; $p < 0,001$), confirmando diferenças consistentes entre as composições, independentemente da condição de ensaio.

Comportamento semelhante foi observado aos 63 dias, com efeito estatisticamente significativo da condição de ensaio ($F = 64,4$; $p < 0,001$), bem como da interação entre condição de ensaio e identificação das misturas ($F = 11,1$; $p < 0,001$). O efeito inter-sujeitos da identificação das misturas manteve elevada significância ($F = 942$; $p < 0,001$), indicando persistência das diferenças entre composições ao longo do tempo de cura.

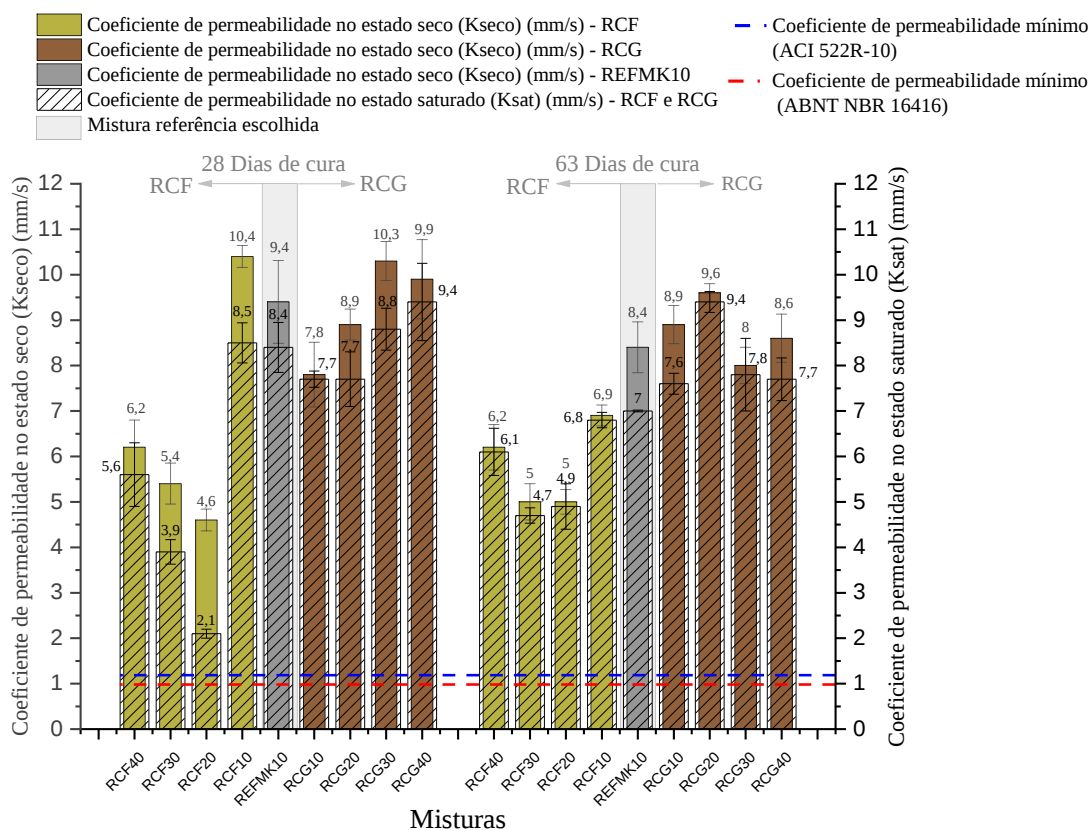
Diante da significância da interação, procedeu-se ao desdobramento por meio do teste de comparações múltiplas de Tukey. A análise aos 63 dias confirmou efeitos significativos do estado de saturação, da composição das misturas e da interação entre esses fatores ($p < 0,001$). As comparações múltiplas, aplicadas separadamente aos coeficientes de permeabilidade em estado seco (Kseco) e saturado (Ksat), indicaram que a mistura RCG30 apresentou os maiores valores de permeabilidade em ambas as condições, diferindo estatisticamente das demais. As

misturas contendo RCF e RCG em teores intermediários formaram um grupo estatisticamente equivalente, enquanto aquelas com maior teor de resíduo fino ou com RCG em determinadas proporções apresentaram os menores coeficientes de permeabilidade.

A manutenção da hierarquia estatística entre 28 e 63 dias pode indicar que o envelhecimento da matriz cimentícia não altera o papel dominante da granulometria e da conectividade dos vazios no desempenho hidráulico do concreto permeável.

Assim como observado no teste de permeabilidade à carga constante, os resultados dos coeficientes de permeabilidade em estado seco (Kseco) e saturado (Ksat) para carga variável, apresentados na Figura 4.16, apresentam o resultado do grau de saturação, do tipo de resíduo, da granulometria e do teor de adição de RCF e RCG. Ao serem comparados com o teste de carga constante, os valores obtidos não apresentam uma correlação linear, o que pode ser atribuído às particularidades operacionais de cada ensaio. O ensaio à carga constante permite maior controle da vazão e da massa de água que percola pelos vazios do concreto permeável, ao passo que o ensaio à carga variável não oferece o mesmo nível de controle durante a realização do teste.

Figura 4.16 – Coeficiente de permeabilidade à carga variável para misturas de concretos permeáveis com RCF e RCG para amostras saturadas e não saturadas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Todas as misturas apresentaram valores superiores aos limites mínimos estabelecidos pela 522R-06 (ACI, 2010) e pela NBR 16416 (ABNT, 2015), reforçando sua adequação para aplicação como concreto permeável.

Conforme esperado, os valores de K_{sat} foram inferiores aos de K_{seco} em todas as formulações. Essa redução decorre do preenchimento parcial dos vazios pela água nas amostras saturadas, o que dificulta o escoamento e diminui a taxa de fluxo (Seifeddine *et al.*, 2025).

As misturas contendo RCG apresentaram os maiores coeficientes de permeabilidade, alcançando aproximadamente 10,3 mm/s (K_{seco}) e 8,8 mm/s (K_{sat}), na mistura RCG30 aos 28 dias. Esse desempenho é consistente com o elevado volume de macroporos interconectados previamente identificado nas análises qualitativas e quantitativas de porosidade. Esse contexto foi apresentado por Zhang *et al.* (2020b), nos quais a conectividade dos vazios, mais do que o volume total de poros, é o principal parâmetro controlador do fluxo em materiais permeáveis.

As misturas contendo RCF apresentaram valores de permeabilidade variando de 4,6 a 10,4 mm/s (K_{seco}) e de 2,1 a 8,46 mm/s (K_{sat}). Apesar de permanecerem acima dos requisitos normativos da 522R-10 (ACI, 2010) e da NBR 16416 (ABNT, 2015), apresentaram menor capacidade de fluxo quando comparadas às misturas com RCG. Esse comportamento resulta da morfologia mais fina das partículas, que tende a preencher e refinar os vazios maiores, reduzindo a conectividade hidráulica mesmo sob porosidades totais semelhantes.

Assim, como realizado para carga constante foi aplicada a ANOVA de medições repetidas para a análise dos resultados do coeficiente de permeabilidade sob carga variável. Para isso, foi considerado como fator intra-sujeito a condição de ensaio (seco e saturado) e como fator inter-sujeito a identificação das misturas.

Aos 28 dias, ocorreu efeito estatisticamente significativo da condição de ensaio ($F = 76,98$; $p < 0,001$), indicando que ocorreram diferenças relevantes entre os coeficientes de permeabilidade nos estados seco e saturado. A interação entre a condição de ensaio e a identificação das misturas também foi significativa ($F = 8,13$; $p < 0,001$). O efeito inter-sujeitos da identificação das misturas apresentou pequena significância estatística ($F = 87,4$; $p < 0,001$), podendo ser identificado que os resultados obtidos no ensaio de carga variável dependem das condições naturais do material.

Comportamento semelhante foi observado aos 63 dias, entretanto observou-se efeito estatisticamente não significativo da condição de ensaio ($F = 5,25$; $p > 0,001$), indicando que não ocorreram diferenças relevantes entre os coeficientes de permeabilidade nos estados seco e saturado. A interação entre a condição de ensaio e a identificação das misturas também foi não

significativa ($F = 1,80$; $p > 0,001$). O efeito inter-sujeitos da identificação das misturas apresentou pequena significância estatística ($F = 22,6$; $p < 0,001$), podendo ser identificado que os resultados obtidos no ensaio de carga variável dependem das condições naturais do material.

Os resultados de porosidade e permeabilidade mostram que a incorporação de resíduos de caulim altera a macro e microestrutura do concreto permeável. Nesse contexto, RCG amplia a capacidade de drenagem por meio da criação de maiores redes de vazios interconectados, enquanto RCF favorece o refinamento desses vazios. Essa variabilidade de desempenho hidráulico é importante para o desenvolvimento de concretos permeáveis otimizados, capazes de se adequar a diferentes contextos de taxa de infiltração.

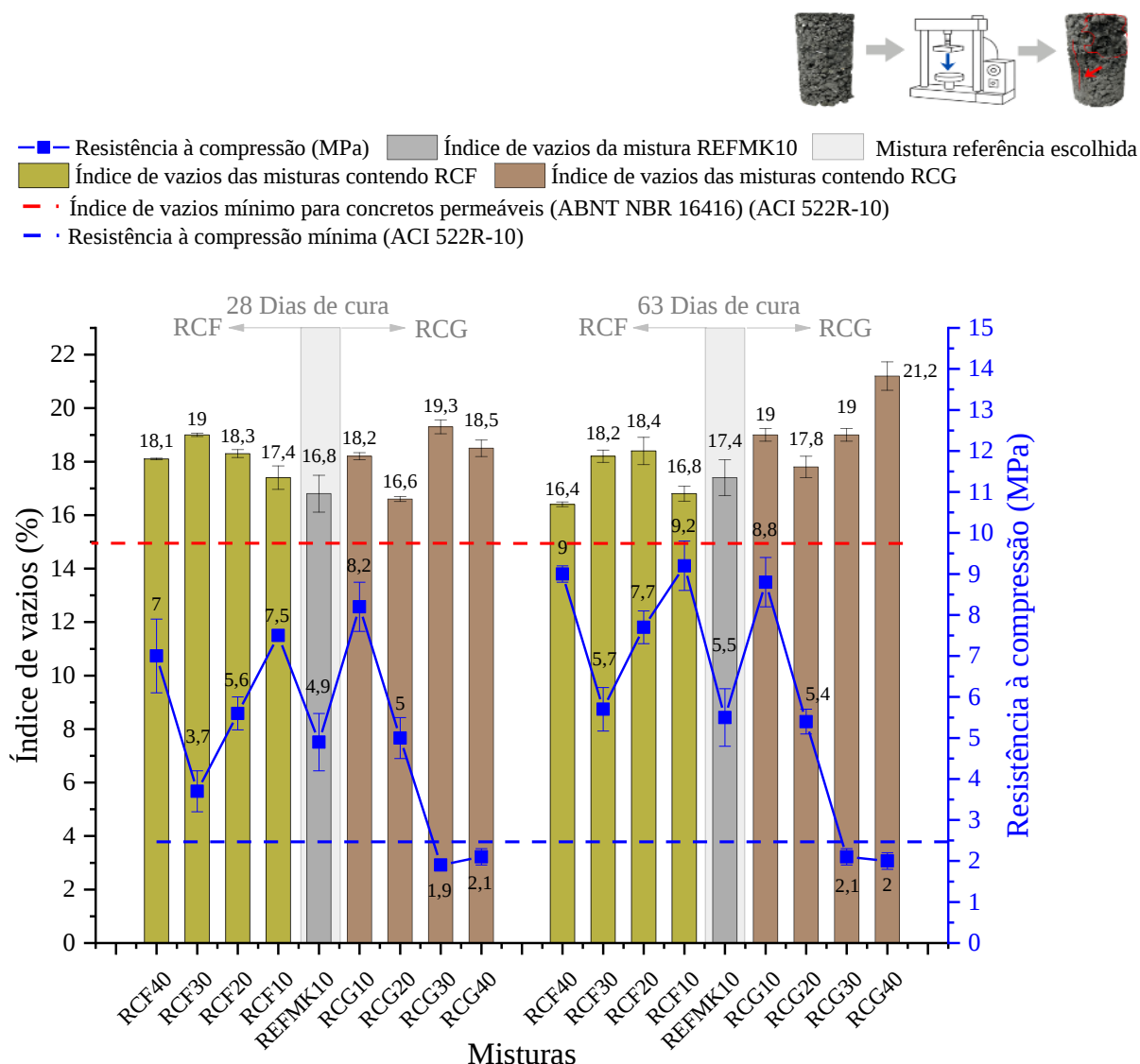
4.4.6 Resistência à compressão, à tração na flexão e perda de massa por abrasão

As Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 apresentam os resultados de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e resistência à abrasão das misturas de concretos permeáveis (REFMK10, RCF10, RCF20, RCF30 e RCF40, RCG10, RCG20, RCG30 e RCG40), correlacionando-os entre si, com as suas respectivas porosidades e idades de cura (28 e 63 dias). Os resultados apresentam os efeitos distintos do tipo e do teor de resíduo na microestrutura e no desempenho mecânico das misturas.

A Figura 4.17 apresenta os resultados de resistência à compressão. Para as misturas com resíduo de caulim fino (RCF10 – RCF40), aos 28 dias, a porosidade manteve-se na faixa típica para concretos permeáveis (17 – 19%), sem tendência de redução com o aumento do teor de RCF. Esse comportamento sugere que o resíduo fino pode indicar rearranjos internos não lineares, próprios de materiais heterogêneos, o que explica o fato de as variações de resistência (3,7 – 7,5 MPa) estarem mais associadas à distribuição dos vazios do que ao teor de resíduo em si (Zhong e Wille, 2016). Ainda assim, o leve preenchimento de vazios intergranulares promovido pelo RCF pode ter contribuído para uma conectividade matricial mais eficiente, sem prejuízo da permeabilidade (Rahul *et al.*, 2025).

Aos 63 dias, esse efeito torna-se mais evidente. Todas as misturas RCF apresentaram incrementos consistentes de resistência, mantendo a tendência observada aos 28 dias e atingindo valores entre 8 e 9 MPa. Esse aumento pode estar relacionado ao efeito combinado do refinamento físico dos poros e da reatividade pozolânica tardia do metacaulim presente na pasta (Delnavaz *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2019; Mohammed *et al.*, 2016; Nazeer *et al.*, 2023).

Figura 4.17 – Correlação entre porosidade e resistência à compressão das misturas de concreto permeável contendo RCF e RCG



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para as misturas contendo resíduo de caulim grosso (RCG), o comportamento é distinto. Aos 28 dias, embora as porosidades se mantenham também dentro dos limites normativos, observa-se maior variação, com valores de 2%, sugerindo que a fração grosseira afeta mais fortemente a distribuição dos vazios interconectados. Isso foi visto na análise qualitativa dos poros. Isso implicou no desempenho da resistência à compressão inferior ao grupo que utilizou RCF, especialmente nos teores mais elevados (RCG30 e RCG40), com valores entre 2 e 4 MPa, abaixo do permitido pela 522R-10 (ACI, 2010).

Esse resultado sugere que o resíduo grosso atua como agregado com menor capacidade de aderência, possivelmente devido à menor área específica e à maior irregularidade

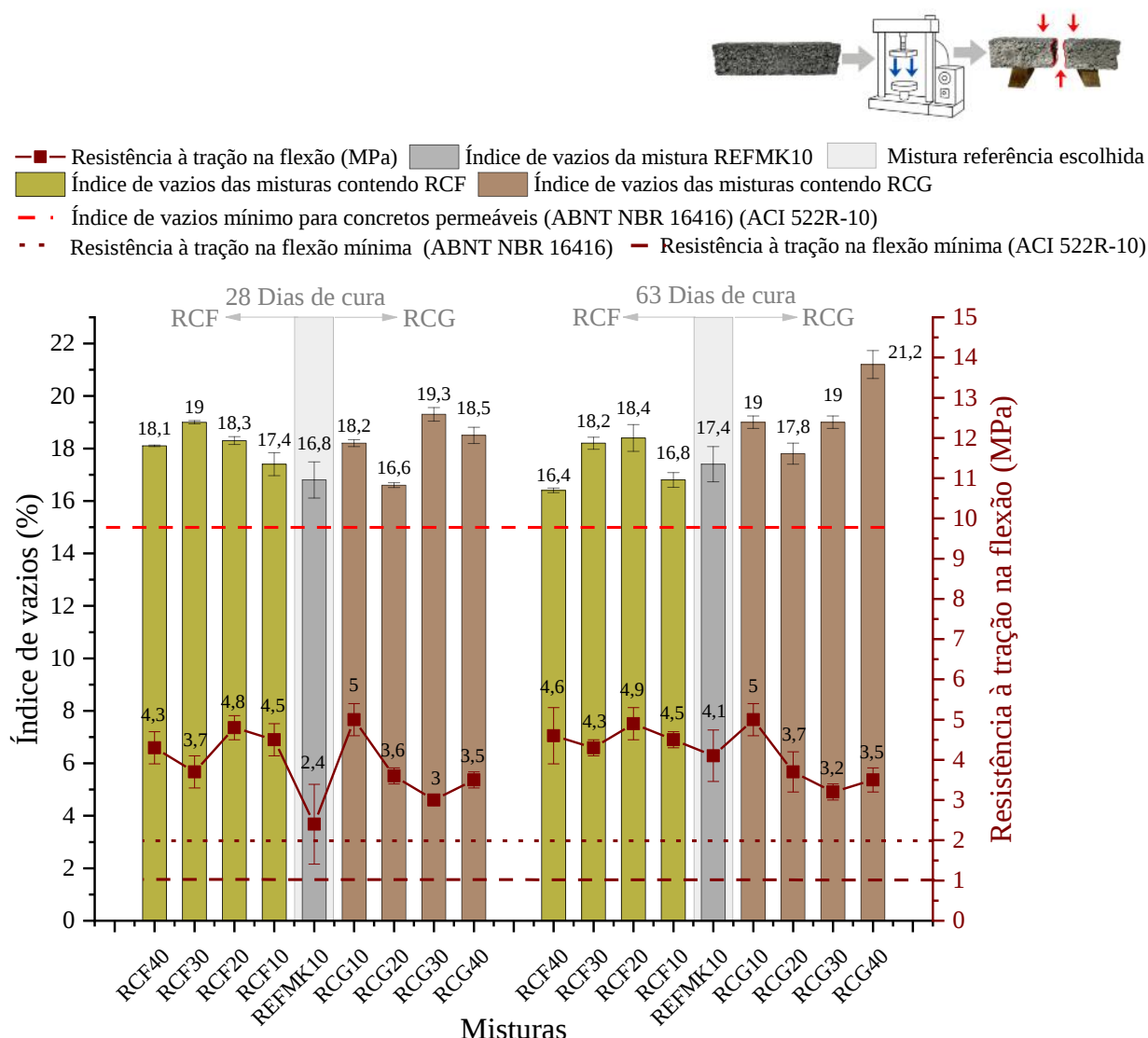
geométrica, contribuindo para falhas na zona de transição pasta/agregado. A presença de vazios localizados e heterogeneidades estruturais reduz a capacidade de transferência de tensões. Isso também foi relatado na pesquisa de Tamimi *et al.* (2023) e de Sriravindrarajah *et al.* (2012), que utilizaram agregados reciclados em misturas de concretos permeáveis. Aos 63 dias, embora haja elevação da resistência, atingindo cerca de 5 – 6 MPa nos teores baixos e até 8,4 MPa no RCG20, o desempenho permanece inferior ao conjunto RCF, reforçando que o resíduo de caulim na sua fração grossa não contribui para o refinamento dos poros.

A Figura 4.18 apresenta a relação entre os resultados de resistência à tração na flexão e a porosidade. As resistências variaram entre 3 e 5 MPa aos 28 dias, com pequenos incrementos aos 63 dias. Os valores obtidos foram superiores aos exigidos pela 522R-10 (ACI, 2010) e pela NBR 16416 (ABNT, 2015), sendo possível sua aplicação em pavimentos permeáveis de tráfego leve, que são solicitados predominantemente à flexão (Singh *et al.*, 2021). Os resultados se destacam por serem comparáveis ou até superiores aos obtidos em estudos que empregaram fibras em misturas de concretos permeáveis para incrementar a resistência à flexão. Por exemplo, Reyad *et al.* (2024) incorporaram fibras de polipropileno, alcançando resistências à flexão em torno de 4,3 MPa.

Assim como observado na compressão, as misturas com RCF apresentaram desempenho superior às com RCG. Mesmo com porosidades semelhantes, as misturas RCF10, RCF20, RCF30 e RCF40 atingiram cerca de 4,5 a 5 MPa aos 63 dias, resultado associado ao melhor empacotamento proporcionado pelos finos e ao preenchimento parcial dos vazios intergranulares, o que aprimora a zona de transição e retarda a propagação de microtrincas sob flexão. A ação pozolânica do metacaulim reforça essa melhoria ao refinar a matriz e aumentar a eficiência na transferência de tensões (Jindal e Ransinchung, 2022; Schackow *et al.*, 2020).

As misturas RCG10, RCG20, RCG30 e RCG40 apresentaram valores inferiores, sobretudo RCG30 e RCG40, com resistências entre 3,0 e 3,5 MPa aos 28 dias e incrementos moderados aos 63 dias. Esse comportamento decorre da menor área específica e da maior irregularidade geométrica do resíduo grosso, que resultam em descontinuidades na interface pasta/agregado e em reduzida capacidade de dissipação de energia, comportamento também relatado em estudos com agregados reciclados de granulometria elevada (Zhu *et al.*, 2020).

Figura 4.18 – Correlação entre porosidade e resistência à tração na flexão das misturas de concreto permeável contendo RCF e RCG

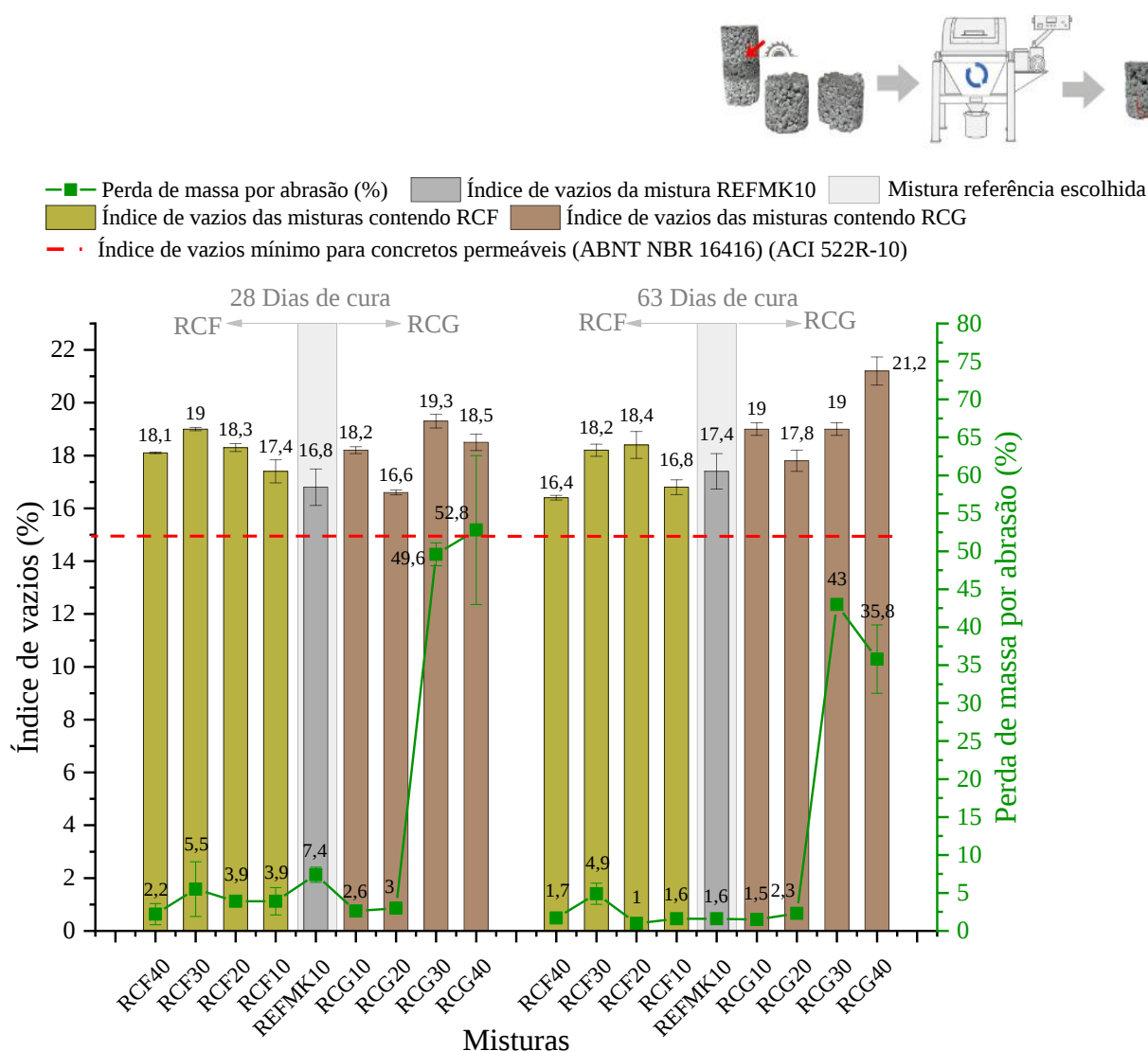


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 4.19 apresenta o desempenho abrasivo. A incorporação do RCF resultou em redução consistente da perda de massa, com valores entre 1% e 4,9%, valores esses inferiores aos obtidos na mistura de referência (7,4%). Esse comportamento está associado ao aumento da densidade da matriz e à diminuição no volume de vazios, observados nas análises de imagem, indicando que as partículas finas atuam como agentes de preenchimento efetivo dos vazios intergranulares, promovendo um aumento na resistência ao desgaste. Tendência semelhante foi relatada por Bai *et al.* (2024), que observaram que a incorporação de finos promove o preenchimento eficaz dos vazios intergranulares, resultando em maior resistência à abrasão.

Por outro lado, a introdução do RCG levou a aumentos expressivos nas misturas RCG30 e RCG40, cujos valores foram 480% a 613% superiores aos da mistura REFMK10. Esse comportamento reforça a justificativa de que partículas mais grossas do resíduo apresentam menor capacidade de ligação com a matriz, resultando em interfaces frágeis e regiões de concentração de tensões. Evidências semelhantes foram discutidas por Hua *et al.* (2021), que realizaram testes de resistência à abrasão em misturas de concreto permeável com mais de 50% de agregado graúdo reciclado, o diâmetro máximo do agregado reciclado era maior.

Figura 4.19 – Correlação entre porosidade e resistência à tração na flexão das misturas de concreto permeável contendo RCF e RCG



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para a resistência à compressão, considerando a violação do pressuposto de normalidade aos 63 dias e visando padronizar o procedimento estatístico entre as idades analisadas, foi

aplicado o teste não paramétrico de *Kruskal–Wallis* aos 28 e aos 63 dias. Os resultados indicaram diferenças estatisticamente significativas entre os grupos aos 28 dias ($\chi^2(10) = 40,4$; $p < 0,001$; $\varepsilon^2 = 0,940$) e aos 63 dias ($\chi^2(10) = 37,5$; $p < 0,001$; $\varepsilon^2 = 0,871$), demonstrando que o tipo de composição exerce efeito relevante sobre o comportamento mecânico. Contudo, as comparações múltiplas pelo método *Dwass–Steel–Critchlow–Fligner* não identificaram diferenças significativas entre pares específicos de grupos, sugerindo que os efeitos observados são globais e de natureza prática, sem contrastes individuais marcantes.

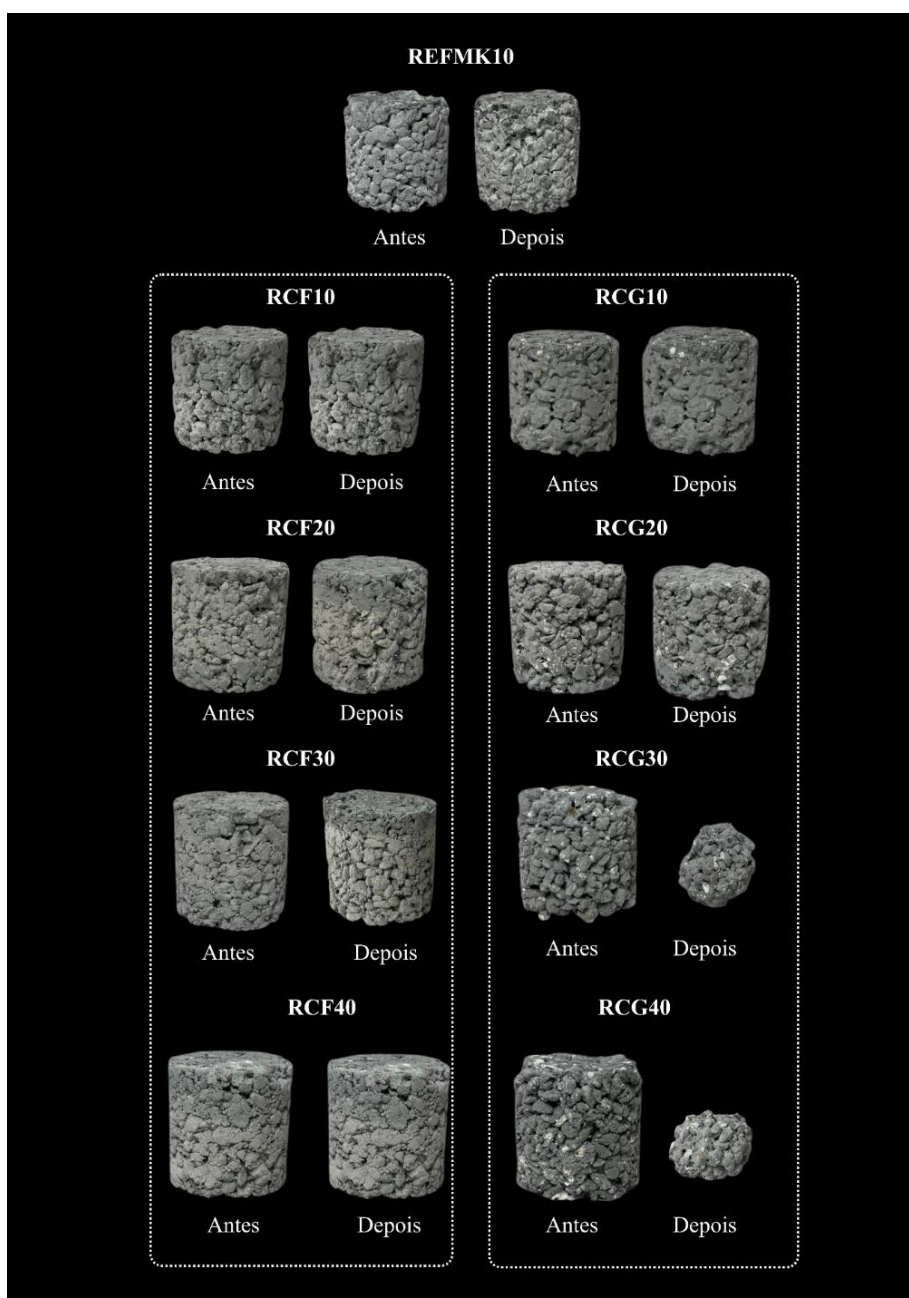
Para a resistência à tração na flexão, devido à violação do pressuposto de homogeneidade de variâncias, especialmente aos 63 dias (teste de Levene, $p < 0,001$), empregou-se a ANOVA de *Welch*, seguida do pós-teste de *Games–Howell*. Os resultados indicaram efeito estatisticamente significativo do tipo de composição sobre a resistência à flexão aos 28 dias ($F(10,12,9) = 33,6$; $p < 0,001$) e aos 63 dias ($F(10,13,2) = 26,3$; $p < 0,001$), evidenciando consistência do efeito da composição sobre a performance mecânica em ambas as idades de cura.

Os resultados de perda de massa por abrasão foram analisados com base no teste não paramétrico de *Kruskal–Wallis*, uma vez que as amostras RCF20 e RCF30 não apresentaram distribuição normal ($p < 0,05$, teste de Levene). O teste indicou diferenças estatisticamente significativas entre os grupos tanto aos 28 dias ($\chi^2(10) = 31,7$; $p < 0,001$; $\varepsilon^2 = 0,738$) quanto aos 63 dias ($\chi^2(10) = 24,4$; $p = 0,007$; $\varepsilon^2 = 0,566$). Apesar disso, as comparações múltiplas pelo método *Dwass–Steel–Critchlow–Fligner* não identificaram diferenças significativas entre pares específicos. Os elevados valores de ε^2 sugerem que as diferenças globais entre as composições são relevantes do ponto de vista prático, mesmo na ausência de contrastes individuais.

Aos 63 dias, ambas as tendências foram mantidas, com variações dentro dos desvios-padrão. O envelhecimento da matriz não foi suficiente para alterar o desempenho das misturas com RCG e RCF observado aos 28 dias. Esses resultados confirmam que a granulometria do resíduo exerce influência determinante sobre o desempenho abrasivo do concreto permeável, afetando diretamente a compactação interna, a distribuição dos vazios e a qualidade da interface pasta/agregado graúdo.

A Figura 4.20 apresenta os efeitos abrasivos nos corpos de prova após o ensaio de desgaste e abrasão aos 28 dias. O desgaste nas composições RCG30 e RCG40 também é notório na imagem. Aos 63 dias, a configuração dos corpos de prova foi similar.

Figura 4.20 – Desgaste por abrasão das misturas: REFMK10, RCF10-40 e GKR10-40



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

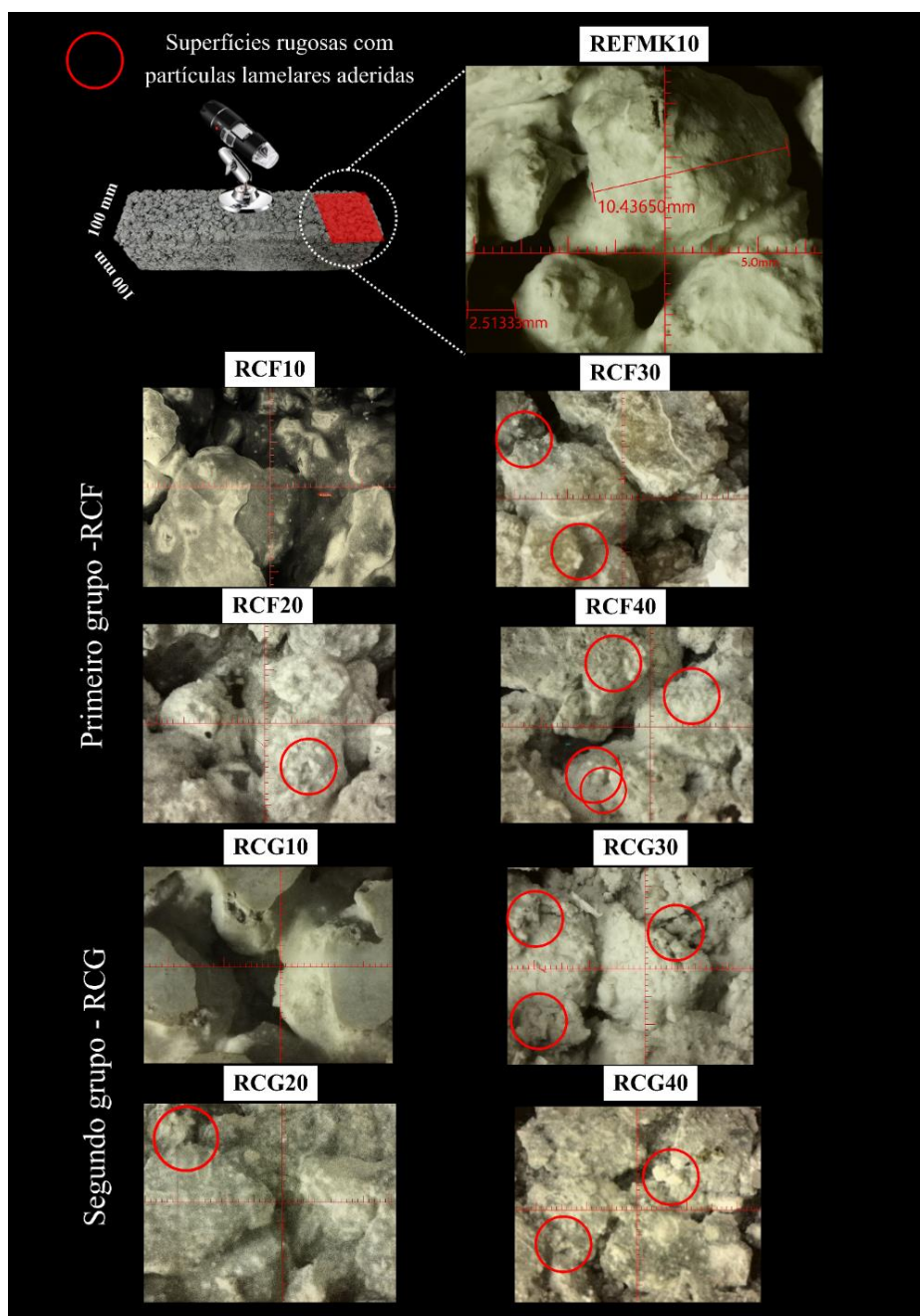
4.4.7 Análise adsortiva em relação aos íons de alumínio e ferro

A capacidade adsortiva foi analisada quanto aos aspectos físicos e químicos das misturas de concreto permeável de referência (REFMK10) e daquelas contendo RCF e RCG.

A Figura 4.21 apresenta as imagens de micrografias retiradas das superfícies das misturas REFMK10, RCF10-40 e RCG10-40. As micrografias revelam que a adição de RCF e RCG nas misturas de concretos permeáveis promoveu mudanças significativas na morfologia superficial. Em comparação com o REFMK10, foram observadas superfícies rugosas,

partículas lamelares aderidas, microcavidades irregulares (indicados com círculos vermelhos na Figura 4.21) e uma redução visível nos canais de maior diâmetro. Essa reorganização da morfologia desempenha papel determinante na função adsorativa do material. A rugosidade superficial e a tortuosidade dos caminhos de fluxo são fatores decisivos para aprimorar os processos de retenção e adsorção em matrizes cimentícias de concretos permeáveis (Adab, H., Abbasi, M., 2024; Ahmadi *et al.*, 2023).

Figura 4.21 – Micrografias das superfícies dos concretos permeáveis: REFMK10, RCF10-40 e GKR10-40



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Do ponto de vista funcional, o aumento da heterogeneidade microestrutural sugere maior disponibilidade de superfícies ativas para a retenção inicial de íons metálicos dissolvidos em água. De acordo com Muthu (2025), essas superfícies irregulares funcionam como pontos de ancoragem, ampliando o número de pontos de adsorção e favorecendo múltiplos mecanismos simultâneos, incluindo troca iônica, complexação e nucleação heterogênea de precipitados metálicos. Nessa perspectiva, a presença de partículas de caulim, ricas em grupos hidroxila e em estruturas alumino-silicáticas, pode contribuir para o aumento da afinidade por cátions trivalentes, como Al^{3+} e Fe^{2+} , reforçando evidências de que resíduos de caulim e metacaulim podem potencializar a capacidade adsorvente de metais em sistemas aquosos (Azanfire *et al.*, 2025; Alhinqari *et al.*, 2025). Entretanto, aspectos relacionados ao comportamento da adsorção após possível saturação dos sítios adsorventes, mecanismos e eventual regeneração da capacidade adsorvente do material, ainda necessitam de investigações complementares.

As mudanças na morfologia são relevantes para adsorver contaminantes presentes nas primeiras enxurradas (*first-flush*), período no qual a concentração de metais dissolvidos na água da chuva tende a ser significativamente maior, demandando mecanismos rápidos de interação sólido-líquido (Mamun *et al.*, 2020; Perera *et al.*, 2021). A combinação entre rugosidade elevada, redução da conectividade dos grandes canais e presença de microcavidades preenchidas pelo resíduo de caulim pode contribuir para a criação de zonas de retenção, prolongando o tempo de residência da solução dentro da matriz (Muthu, 2025). Dessa forma, o desempenho adsorvente em pavimentos permeáveis depende da cinética inicial de contato e do aproveitamento dessas zonas de microretenção. A modificação introduzida pelo RCF e pelo RCG tende a potencializar a captura de Al^{3+} e Fe^{2+} justamente nos primeiros instantes de infiltração, quando a carga poluente é mais crítica.

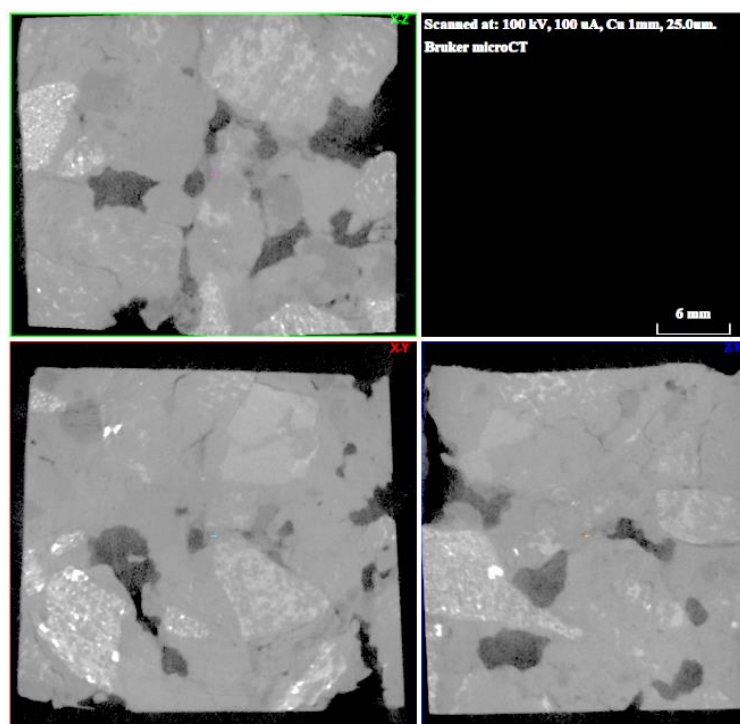
Além disso, a coexistência de poros maiores e pequenos canais parcialmente obstruídos, observada nas misturas contendo RCG (Figura 4.13) sugere que sistemas porosos híbridos, com dupla escala de poros, apresentam desempenho superior em aplicações ambientais, pois equilibram permeabilidade hidráulica e elevada capacidade de remoção (Zhu *et al.*, 2020). A interpretação das micrografias reforça, portanto, a hipótese central deste estudo: o resíduo de caulim não apenas modifica fisicamente a microestrutura, mas atua como elemento ativador da adsorção do concreto, ampliando sua capacidade de adsorção durante as primeiras enxurradas.

A análise por micro-CT foi realizada de especificamente na amostra contendo resíduo de caulim (RCG40), por apresentar o maior teor de substituição entre as misturas avaliadas,

tornando mais representativos e perceptíveis os efeitos da incorporação do resíduo sobre a microestrutura do material.

A tomografia computadorizada por raios X em microescala (micro-CT) possibilitou uma visualização tridimensional detalhada da microestrutura interna do concreto permeável. As seções ortogonais, obtidas por meio do software *DataViewer* (Figura 4.22), evidenciaram a presença de três fases principais no interior do corpo de prova, sendo elas: a fase branca, correspondente ao resíduo de caulim; a fase cinza-escuro, associada ao agregado gráúdo natural; e a fase cinza intermediária, representativa da matriz cimentícia. Essas fases foram claramente distinguidas em função de seus diferentes coeficientes de atenuação dos raios X, permitindo uma avaliação qualitativa da heterogeneidade do material e da distribuição das partículas.

Figura 4.22 – Seções ortogonais obtidas por micro-CT da mistura RCG40, reconstruídas no software *DataViewer* (Bruker micro-CT), evidenciando a distribuição das fases: branco – resíduo de caulim; cinza-escuro – agregado gráúdo natural; cinza intermediário – fase cimentícia. Condições de varredura: 100 kV, 100 μ A, filtro de Cu de 1 mm e tamanho de voxel de 25 μ m



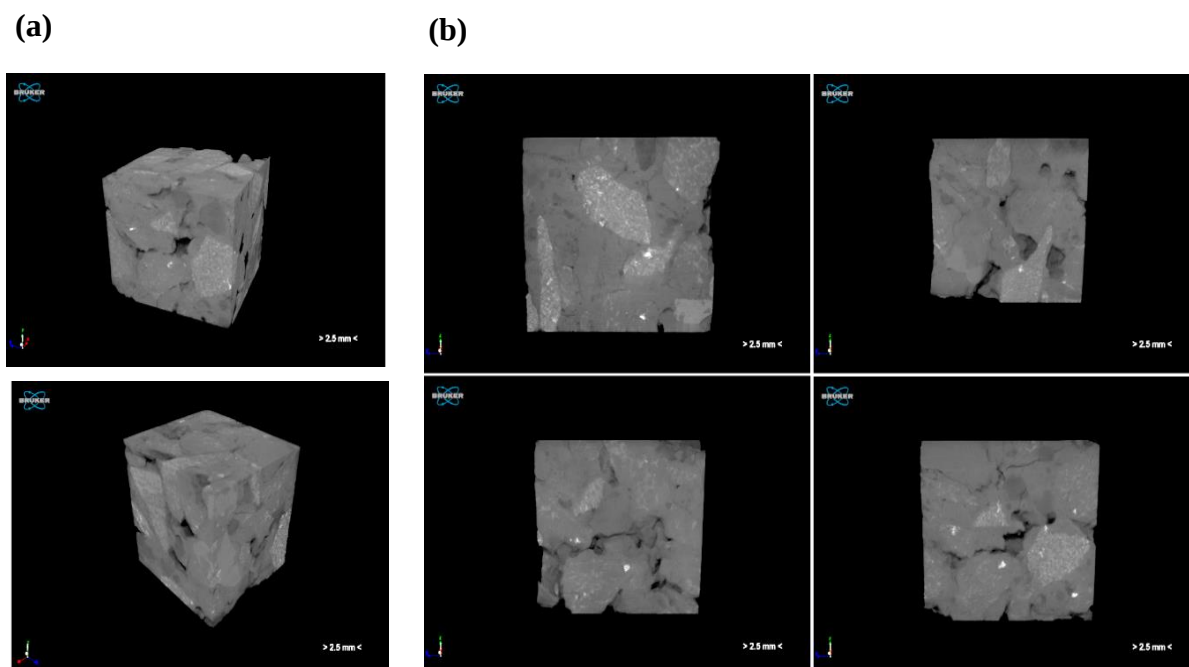
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A renderização tridimensional obtida por meio do software *CTvox* (Figura 4.23a) confirmou o arranjo compacto do material e a dispersão homogênea das partículas de resíduo de caulim no interior da fase cimentícia. As seções internas (Figura 4.23b) evidenciaram ainda que a maioria dos poros se encontra predominantemente localizada nas regiões de transição interfacial, isto é, nas interfaces entre os agregados gráudos naturais e a matriz cimentícia, as

quais, em geral, apresentam maior porosidade e menor densidade em função de variações locais no grau de hidratação e na eficiência do empacotamento.

Ainda assim, a estrutura interna apresentou-se bem consolidada, com porosidade interconectada limitada e forte aderência entre as diferentes fases constituintes. De modo geral, as observações por micro-CT indicam uma microestrutura densa, com fronteiras de fase bem definidas e baixa incidência de descontinuidades internas, sendo a porosidade majoritariamente associada às interfaces agregado–matriz.

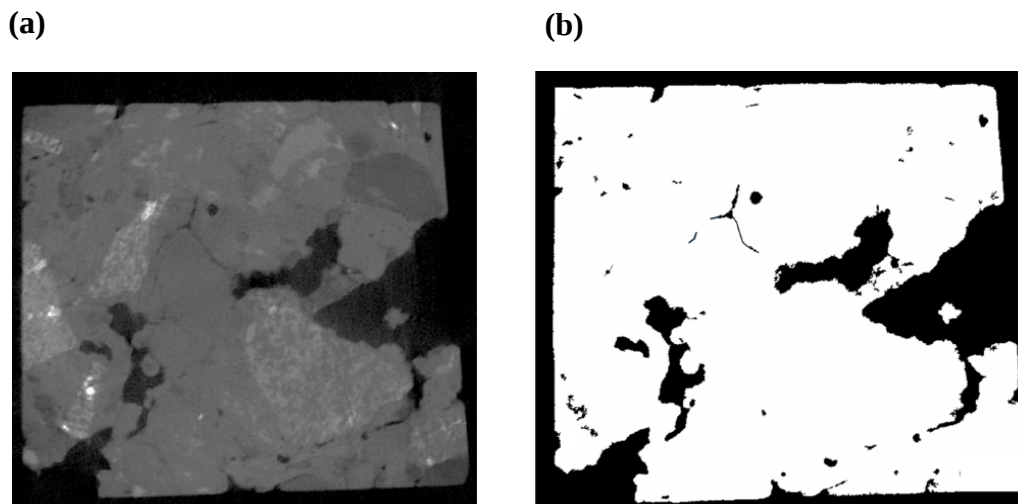
Figura 4.23 – (a) Reconstrução tridimensional da mistura RCG40 gerada no software CTVox (Bruker micro-CT), ilustrando a configuração microestrutural global e a dispersão das partículas. (b) Seções internas extraídas do volume tridimensional no CTVox, evidenciando as zonas de transição interfacial e a distribuição dos poros e das fases sólidas no interior do material



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise quantitativa realizada no software *CTAn* forneceu informações complementares acerca da estrutura porosa no volume de interesse (VOI) selecionado. Para esse fim, as imagens reconstruídas foram binarizadas utilizando um limiar global de 26–255, de modo a distinguir o espaço poroso da matriz sólida (Figura 4.24). Esse procedimento permitiu a quantificação da porosidade aberta, fechada e total no *CTAn*. A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos principais parâmetros morfológicos obtidos a partir da análise por micro-CT.

Figura 4.24 – Exemplo de binarização de imagens no software CTAn (Bruker micro-CT). A imagem original em escala de cinza (mistura RCG40) (a) e a imagem binarizada correspondente (b) ilustram a separação, baseada em limiar, entre a matriz sólida (branco) e o espaço poroso (preto), utilizada como base para a quantificação da porosidade



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Tabela 4.1 – Parâmetros morfométricos obtidos no software CTAn (Bruker micro-CT, Kontich, Bélgica) para o volume de interesse (VOI) analisado

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Volume total do VOI	VT	2.02×10^{13}	μm^3
Volume do objeto	Obj.V	1.77×10^{13}	μm^3
Percentual de volume do objeto	Obj.VT	87.38	%
Porosidade fechada	Po(f)	0.59	%
Volume de poros abertos	Vpo(a)	2.45×10^{12}	μm^3
Porosidade aberta	Po(op)	12.10	%
Porosidade total	Po(tot)	12.62	%
Conectividade	Con	40,242	–
Densidade de conectividade	D.Con	1.99×10^{-9}	$1/\mu\text{m}^3$
Índice de modelo estrutural	IME	–32.7	–
Dimensão fractal	DF	2.26	–
Grau de anisotropia	GA	1.26	–

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O volume total do VOI (Tabela 14) foi de $2,02 \times 10^{13} \mu\text{m}^3$ ($20,2 \text{ mm}^3$), dos quais a fase sólida representou $1,77 \times 10^{13} \mu\text{m}^3$ ($\approx 17,7 \text{ mm}^3$), correspondendo a 87,38% do volume total. Os 12,62% restantes correspondem à porosidade total, predominantemente composta por poros abertos (12,10%), com contribuição minoritária de poros fechados (0,59%). Essa elevada proporção de porosidade aberta indica a existência de uma rede porosa interconectada, consistente com as características microestruturais observadas nas Figuras 4.26 a 4.28.

O índice de modelo estrutural ($\text{SMI} = -32,7$, Tabela 8) e a dimensão fractal ($\text{FD} = 2,26$, Tabela 4.1) indicam uma estrutura compacta e morfologicamente complexa, típica de materiais

cimentícios densos. Valores negativos de SMI são característicos desse tipo de material, nos quais a estrutura porosa tende a formar uma rede interconectada, em vez de vazios esféricos isolados.

O grau de anisotropia ($DA = 1,26$, Tabela 4.1) indica que a estrutura porosa é majoritariamente isotrópica, apresentando apenas uma leve orientação preferencial. A densidade de conectividade ($1,99 \times 10^{-9} \text{ 1}/\mu\text{m}^3$) e o número de Euler (-18.858) corroboram a presença de uma rede porosa interconectada, localizada principalmente nas zonas de transição interfacial, isto é, nas regiões entre os agregados grãos naturais e a matriz cimentícia, que tipicamente apresentam maior porosidade e menor densidade em comparação à matriz de volume.

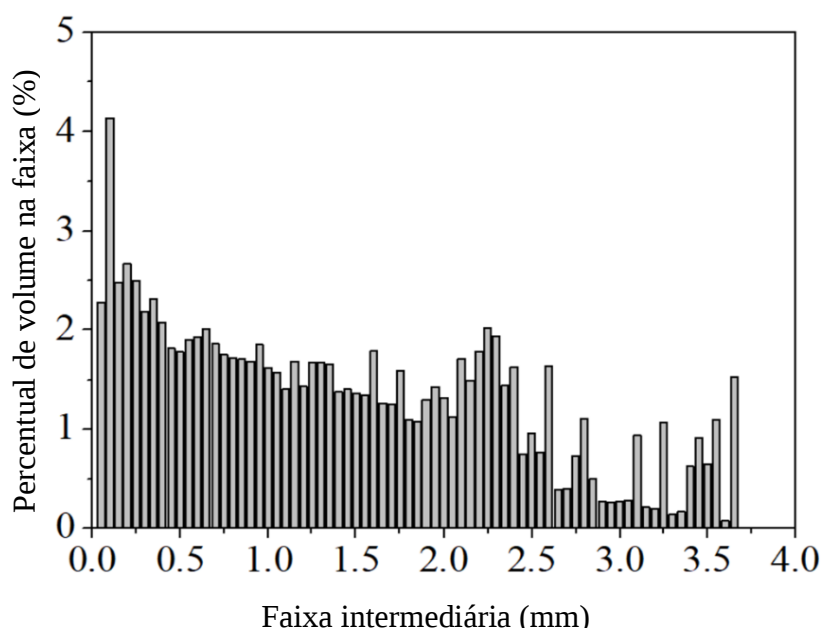
Esses resultados quantitativos validam as observações visuais obtidas por meio da reconstrução tomográfica, evidenciando um material compósito bem consolidado, com porosidade moderada, predominantemente aberta e distribuição homogênea do resíduo de caulim na matriz cimentícia.

De modo geral, os resultados de micro-CT evidenciam a eficiência do resíduo de caulim na promoção de uma estrutura compósita homogênea e compacta, com porosidade predominantemente associada às regiões interfaciais. Esses achados indicam uma melhora na aderência entre as fases, com potencial para elevar tanto o desempenho mecânico quanto a durabilidade do material ao longo do tempo.

Além disso, a morfologia observada e a distribuição dos poros podem também favorecer mecanismos de adsorção, uma vez que a textura superficial e as regiões interfaciais da matriz podem atuar como sítios potenciais para retenção de contaminantes.

A Figura 4.25 apresenta a distribuição do volume de poros em função do diâmetro equivalente dos poros, obtida a partir da análise por tomografia computadorizada em microescala (micro-CT).

Figura 4.25 – Curva de distribuição do tamanho de poros obtida no software CTA_n, apresentando a porcentagem do volume total de poros em função do diâmetro equivalente dos poros (mm)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

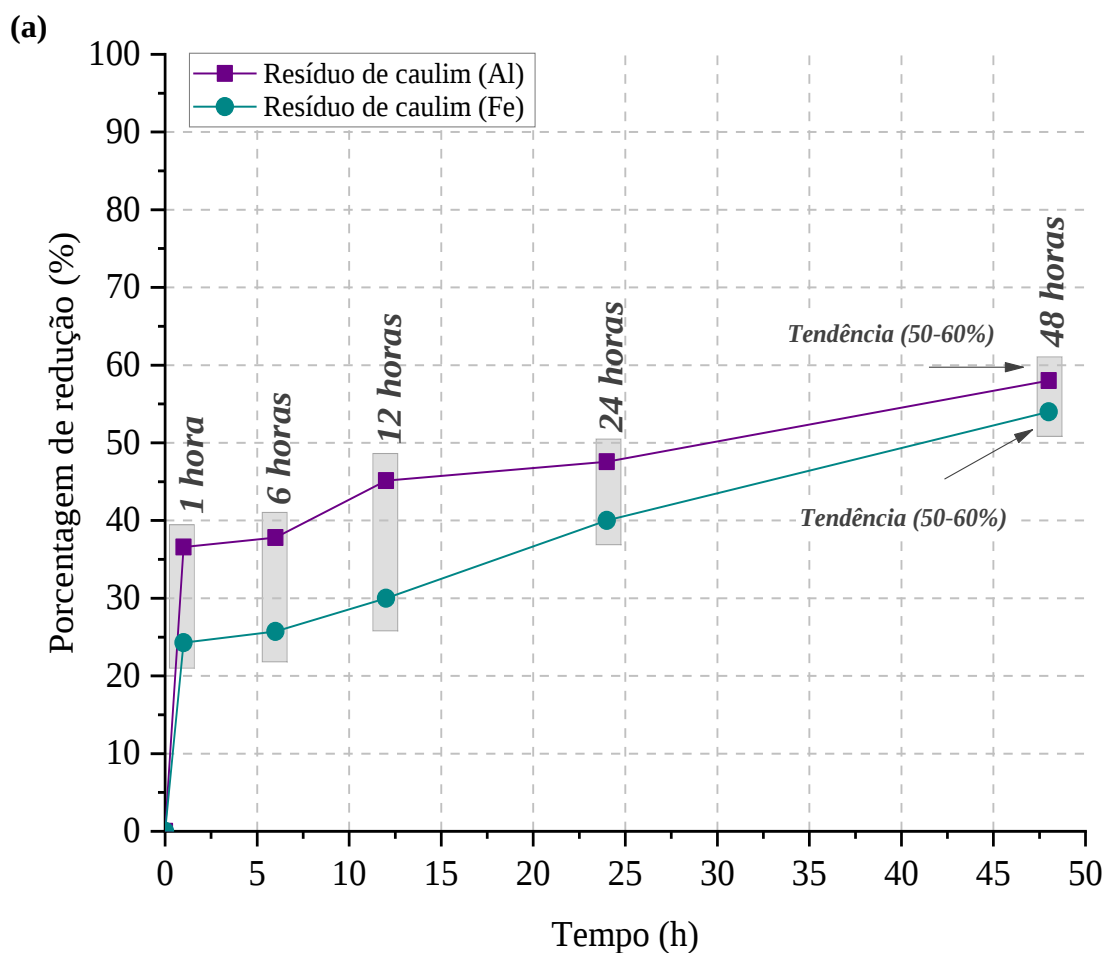
A distribuição apresenta uma redução gradual da frequência com o aumento do tamanho dos poros, indicando a predominância de poros finos. Aproximadamente 50% do volume total de poros corresponde a poros com diâmetro inferior a 1,25 mm, enquanto os 50% restantes estão associados a poros com diâmetros entre 1,25 e 3,65 mm. A maior frequência ocorre no intervalo entre 0,10 e 0,30 mm, representando a moda da distribuição, com contribuições individuais por classe variando entre 2% e 4%.

Embora os poros finos e médios predominem na porosidade total, o material também apresenta uma proporção significativa de poros de maior dimensão (macroporos), que se estendem até aproximadamente 3,5–3,6 mm de diâmetro. Esses macroporos estão provavelmente associados às zonas de transição interfacial e à presença de imperfeições locais de empacotamento. De forma geral, a distribuição do tamanho de poros reflete uma microestrutura heterogênea, porém relativamente compacta, na qual a maior parte da porosidade corresponde a micro e mesoporos, enquanto a ocorrência de vazios maiores sugere aprisionamento parcial de ar ou compactação limitada em regiões específicas.

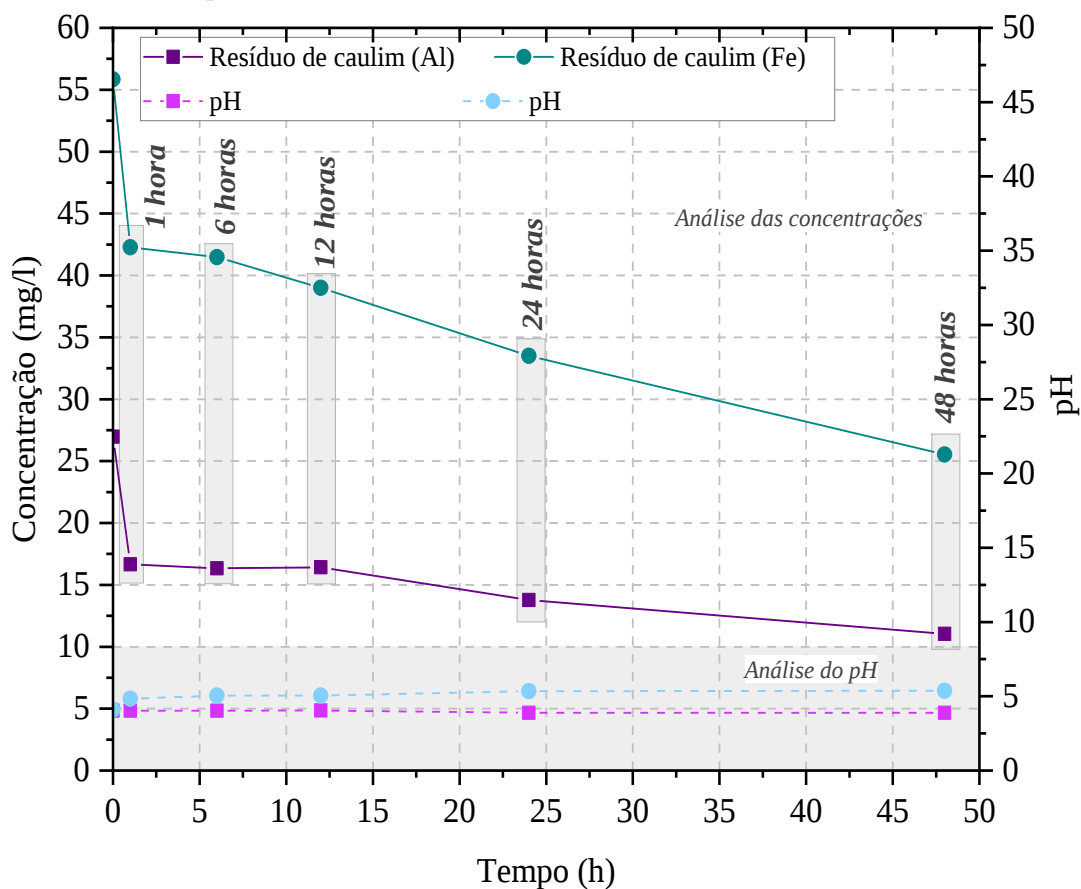
A presença de óxidos como Fe_2O_3 , K_2O , P_2O_5 e BaO no MK e no resíduo de caulim (Tabela 4.1) sugere possível influência no processo de adsorção de íons metálicos, porque esses óxidos podem participar dos mecanismos físico-químicos envolvidos na adsorção de metais pesados, reforçando o interesse desses materiais para aplicações adsorptivas.

Dessa forma, a análise da adsorção de íons metálicos foi realizada inicialmente em amostras de resíduo de caulim (isoladas), com o objetivo de verificar a sua capacidade adsortiva em águas contaminadas com íons de alumínio e ferro (simuladas em laboratório). Após 48 horas de imersão na água contaminada, observou-se uma redução aproximada de 60% na concentração de íons Al^{3+} e superior a 50% na de íons Fe^{2+} (Figura 4.26a). Além disso, não foi detectada variação significativa de pH com a remoção progressiva dos íons de alumínio e ferro das soluções, evidenciando a estabilidade química do sistema e o controle em relação à solução de referência (Figura 4.26b).

Figura 4.26 – Análise da adsorção em amostras com resíduo de caulim: a) percentual de redução em relação ao tempo e b) concentração de íons de alumínio e ferro e variação do pH em relação ao tempo



(b)

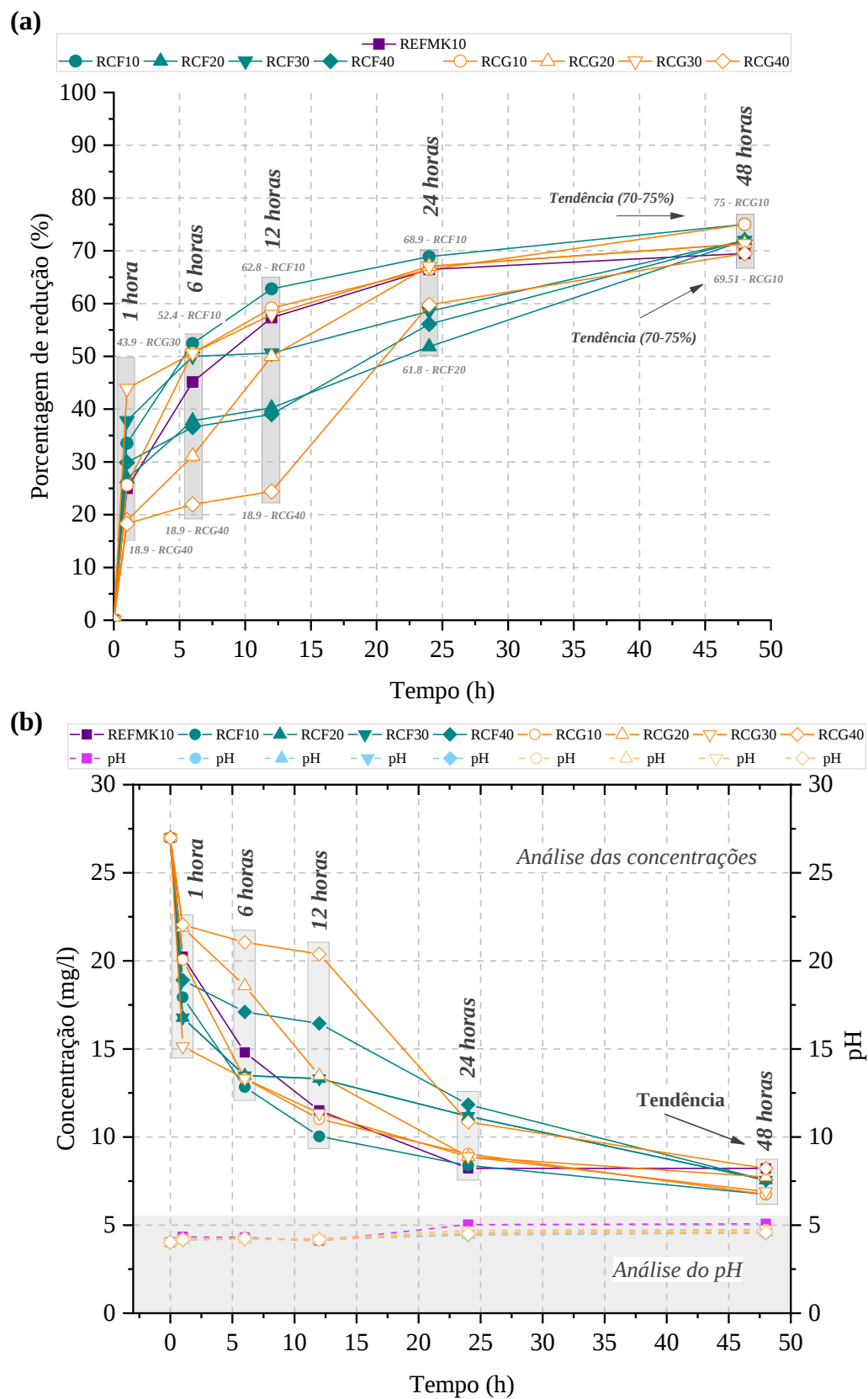


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os ensaios de adsorção nas misturas de concretos permeáveis foram realizados para as amostras com maiores idades de cura (63 dias), tempo necessários para iniciar a consolidação das reações pozolânicas das misturas.

A Figura 4.27a apresenta a cinética de adsorção de íons Al^{3+} ao longo das primeiras 48 horas nas misturas de concreto permeável com 63 dias de cura. Observa-se que a maior parte da remoção ocorre nas primeiras horas de contato, especialmente entre 1 e 6 horas, período no qual as misturas atingem entre 20 e 55% de redução, variando conforme o teor e a granulometria dos resíduos incorporados. Esse comportamento evidencia a elevada disponibilidade inicial de sítios ativos, característica crucial para aplicações em eventos de *first-flush*, nos quais a carga de contaminantes é máxima (Muthu, 2025).

Figura 4.27 – Adsorção de íons de alumínio: a) Porcentagem de redução de íons de Al em relação ao tempo; b) Concentrações e pH em relação ao tempo



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As misturas contendo resíduo fino (RCF10, RCF20, RCF30 e RCF40) apresentaram o melhor desempenho na fase inicial. Na primeira hora, todas superaram 20% de remoção, destacando-se a RCF30, que atingiu aproximadamente 40%. Também se verifica que, nesse intervalo, todas as misturas com RCF apresentaram desempenho superior ao da mistura de referência (REFMK10). Ao final de 48 horas, essas misturas alcançaram entre 85% e 95% de remoção, atingindo condição de quase equilíbrio. A cinética de remoção está em plena consonância com as alterações morfológicas, como a presença de partículas lamelares, maior rugosidade superficial, tortuosidade de fluxo e formação de microcavidades, aumentando significativamente a área específica e a densidade de sítios de adsorção, favorecendo mecanismos simultâneos de troca iônica, complexação e nucleação heterogênea (Adab, Abbasi, 2024; Ahmadi *et al.*, 2023).

As misturas contendo RCG (RCG10 – RCG40) apresentaram desempenho inicial mais moderado, coerente com sua menor área específica e baixa reatividade superficial. Ainda assim, ao longo do ensaio, evoluíram de forma consistente, atingindo entre 70% e 85% de remoção após 48 horas. Esse comportamento indica que, embora menos eficientes nas primeiras horas, os agregados grosseiros ainda contribuem para a formação de microzonas de retenção associadas à redução de conectividade dos vazios maiores (Zhu *et al.*, 2020).

A Figura 4.27b apresenta a evolução simultânea da concentração remanescente de alumínio e do pH da solução. Um aspecto notável e diferencial deste estudo é a estabilidade do pH ácido durante todo o experimento, independentemente da mistura. A ausência de aumento significativo de pH demonstra que não ocorreu lixiviação dos hidróxidos da matriz cimentícia, responsável por aumentar o pH para valores alcalinos devido à liberação de Ca(OH)_2 e aluminatos hidratados. O aumento do pH dificulta distinguir se a remoção de metais ocorre por adsorção real ou por precipitação química induzida pela alcalinização do meio. No presente estudo, a estabilidade ácido-neutra do sistema confirma que a remoção de Al^{3+} resulta predominantemente de processos intrínsecos de interação sólido-líquido, reforçando o caráter adsorptivo do material.

Os estudos de Krishnan *et al.* (2022) e Li *et al.* (2024) apresentaram a capacidade adsorptiva do concreto permeável imerso em soluções contaminadas com íons de metais pesados, e registrando remoções de até 80% dos poluentes após 24 horas de análise. Esse concreto permeável tinha em sua composição agregado e cimento convencional.

Os resultados foram analisados por meio da ANOVA de medidas repetidas, considerando como fator intra-sujeitos os tempos de avaliação em horas (1, 6, 12, 24 e 48 horas)

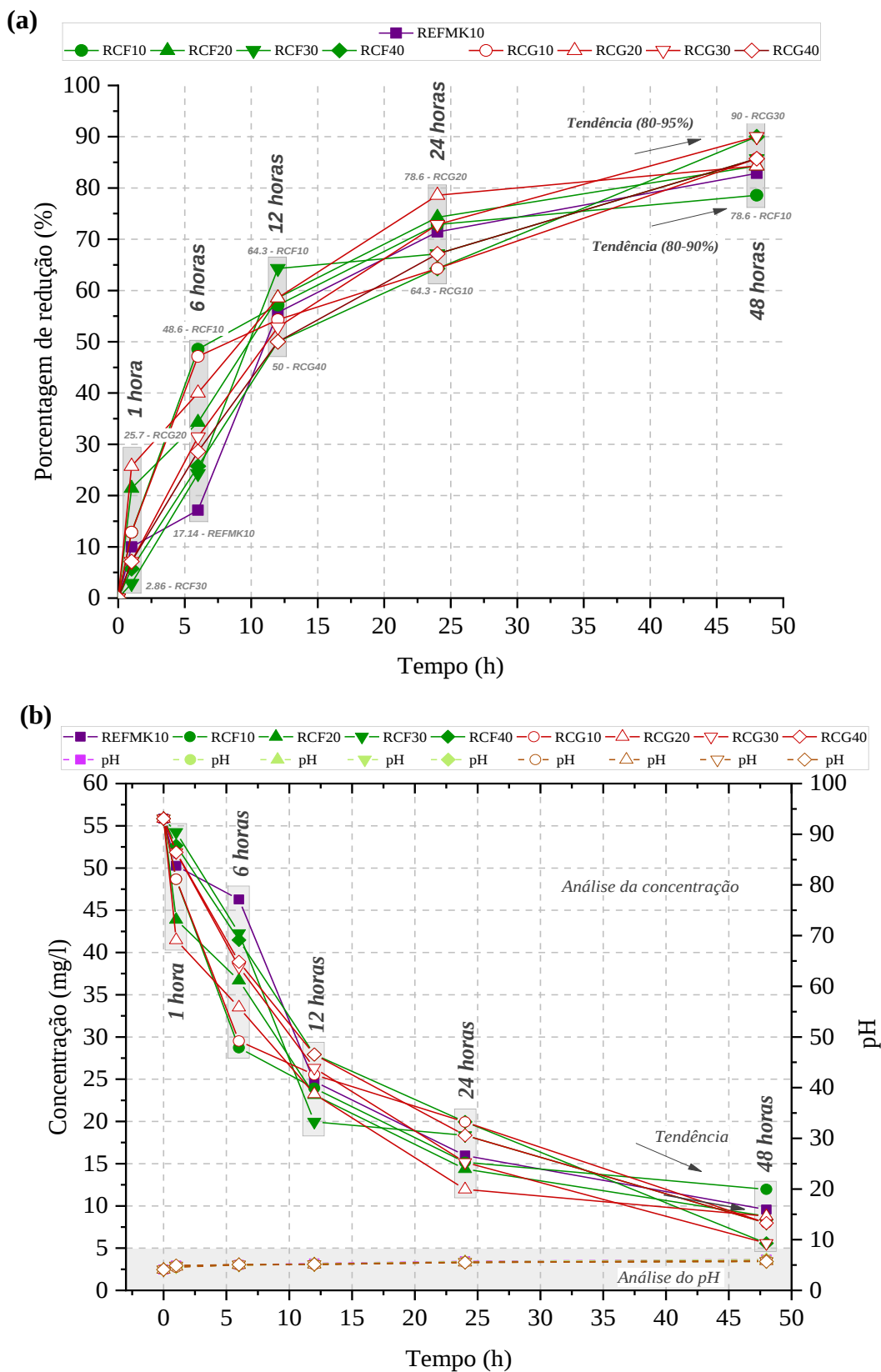
e como fatores inter-sujeitos os grupos estudados (RCF e RCG). Os resultados evidenciaram efeito significativo do fator tempo sobre a concentração de alumínio ($F(5,30) = 67,55$; $p < 0,001$; $\eta^2p = 0,918$), indicando que os valores do elemento variaram ao longo das etapas de monitoramento, com maior expressividade nas primeiras horas, para as misturas que continham RC. O elevado tamanho de efeito associado a esse fator sugere que grande parte da variação observada está relacionada com o tempo, evidenciando a influência das condições experimentais ao longo do período analisado.

Também foram observadas interações significativas entre o tempo e os grupos. Sendo que o RCF obteve $F(5,30) = 3,69$; $p = 0,010$ e $\eta^2p = 0,381$, já o RCG obteve $F(5,30) = 3,47$; $p = 0,014$ e $\eta^2p = 0,367$. Isso indica que a diminuição da concentração do alumínio ao longo do tempo não ocorreu de forma uniforme entre as misturas analisadas. Dessa forma, embora as diferenças médias entre os grupos não tenham sido estatisticamente significativas quando consideradas isoladamente (RCF: $F(1,6) = 2,26$; $p = 0,183$; $\eta^2p = 0,274$ e RCG: $F(1,6) = 1,38$; $p = 0,284$; $\eta^2p = 0,188$), a evolução durante o tempo apresentou padrões distintos dependendo da granulometria do material.

A análise complementar da matriz de correlação apresentou que ocorreram associações positivas entre algumas etapas consecutivas do experimento, destacando-se as correlações entre os tempos 6 e 12 horas ($r = 0,876$; $p = 0,002$) e entre 12 e 24 horas ($r = 0,710$; $p = 0,032$). Esses resultados indicam certa continuidade no comportamento das concentrações do alumínio ao longo das medições, sugerindo que valores mais elevados em determinados momentos tendem a se refletir nas etapas subsequentes do ensaio. Além disso, observou-se correlação negativa significativa entre o grupo RCG e o tempo de 24 unidades ($r = -0,701$; $p = 0,035$), podendo indicar uma possível influência da granulometria mais grossa na redução da concentração de alumínio nesse estágio específico do experimento.

Figura 4.28a apresenta a cinética de adsorção de íons de ferro, cujo comportamento segue tendência semelhante ao observado para o alumínio. As remoções iniciais foram entre 25 e 48% nas primeiras 6 horas, evidenciando elevada disponibilidade inicial de sítios ativos, fator essencial para o tratamento de águas de primeiras enxurradas, quando as concentrações contaminantes metálicas são mais elevadas. Após esse período, a taxa de adsorção torna-se mais gradual, alcançando valores entre 70% e 90% ao final de 48 horas.

Figura 4.28 – Adsorção de íons de ferro: a) Porcentagem de redução de íons de Fe em relação ao tempo; b) Concentrações e pH em relação ao tempo



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As formulações RCG30-RCG40 e RCF30-RCF40 novamente se destacaram, confirmando que o aumento da área superficial, a maior rugosidade e a presença de sítios associados às partículas de resíduo favorecem mecanismos de troca iônica e complexação com espécies férricas. Diferentemente do observado para o alumínio, todas as misturas contendo RCG ou RCF apresentaram desempenho superior ao da mistura de referência (REFMK10) desde as primeiras horas. Esse resultado reforça a hipótese central deste trabalho de que a incorporação do resíduo de caulim confere ao concreto permeável uma capacidade adsortiva rapidamente ativada, particularmente importante em cenários de escoamento inicial (*first-flush*) (Adab, H., Abbasi, M., 2024; Ahmadi *et al.*, 2023).

A Figura 4.28b mostra que a concentração remanescente de ferro apresenta queda progressiva e quase linear nas primeiras 24 horas, seguida de uma redução mais lenta até 48 horas. A profundidade e a complexidade das microestruturas formadas pela incorporação do caulim, já discutidas nas análises morfológicas, contribuem diretamente para esse processo, atuando como zonas de microretenção que prolongam o tempo de residência do contaminante na matriz (Zhu *et al.*, 2020).

Assim como observado para o alumínio, o pH permaneceu praticamente constante ao longo de todo o ensaio, independentemente da formulação. Esse resultado é crucial: indica que não ocorreu lixiviação expressiva de hidróxidos da matriz cimentícia, em contraste com estudos que relatam aumento do pH devido à liberação de Ca(OH)_2 ou hidróxidos aluminatos. Nessa perspectiva, pode ser confirmado que a remoção de ferro não está associada à precipitação química de Fe(OH)_3 induzida por aumento de pH, mas sim à adsorção real, resultado direto das propriedades físico-químicas dos concretos modificados (Mamun *et al.*, 2020; Perera *et al.*, 2021).

Ainda na Figura 4.28b, verifica-se que as misturas contendo RCF apresentaram desempenho ligeiramente superior ao das misturas com RCG. Esse comportamento reforça a importância da granulometria mais refinada, a qual aumenta a densidade de sítios ativos, a área específica e a afinidade adsortiva da matriz, favorecendo a captura de espécies metálicas em ambientes aquosos.

Assim como na análise da adsorção dos íons de alumínio, a adsorção do ferro foi avaliada por meio de ANOVA de medidas repetidas, considerando os mesmos fatores intra-sujeitos e inter-sujeitos. Os resultados indicaram efeito significativo do fator tempo sobre a quantidade de ferro adsorvida ($F(5,30) = 64,75$; $p < 0,001$; $\eta^2p = 0,915$), evidenciando que a

adsorção variou de forma expressiva ao longo do tempo, com relevância para as primeiras horas.

Não foram identificadas interações significativas entre o tempo e os grupos estudados. Foi constatado que a análise tempo $\times$ RCG obteve os seguintes parâmetros: $F(5,30) = 0,96$; $p = 0,460$ e $\eta^2p = 0,137$, já a análise tempo $\times$ RCF obteve os seguintes parâmetros: $F(5,30) = 0,59$; $p = 0,705$ e $\eta^2p = 0,090$. Esses resultados indicam que o padrão de variação da adsorção de ferro ao longo do tempo ocorreu de maneira relativamente semelhante entre as diferentes misturas. Da mesma forma, os efeitos principais do RCF e do RCG também não apresentaram significância estatística (RCG: $F(1,6) = 1,08$; $p = 0,340$; $\eta^2p = 0,152$ e RCF: $F(1,6) = 0,43$; $p = 0,537$; $\eta^2p = 0,067$), sugerindo que, de forma geral, as diferenças entre as granulometrias não foram suficientes para produzir variações médias relevantes na quantidade adsorvida.

A matriz de correlação de Pearson indicou poucas associações significativas entre os tempos analisados. Destaca-se apenas a correlação positiva entre os tempos 1 e 24 ($r = 0,733$; $p = 0,025$), sugerindo que amostras com maiores valores iniciais de adsorção tendem a manter valores relativamente mais elevados nas etapas intermediárias do experimento. Isso está relacionado com as observações sugeridas, indicando que ocorre uma maior adsorção nas primeiras horas para as misturas que continham resíduo de caulim.

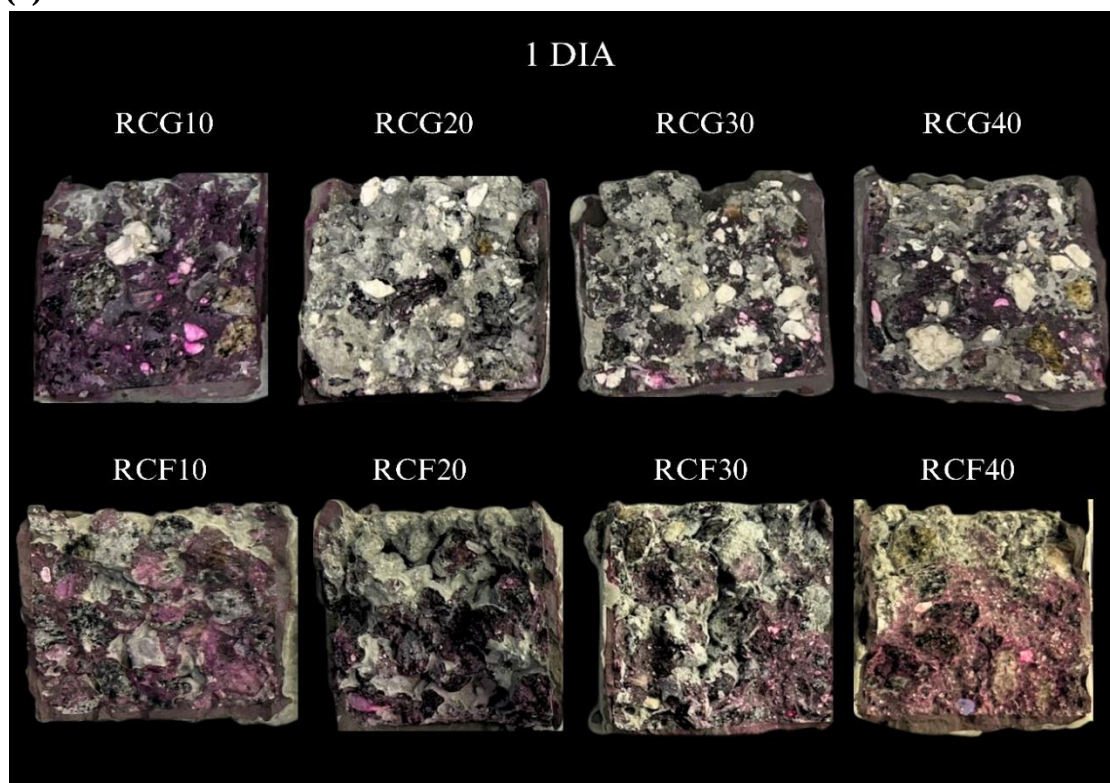
4.4.8 Durabilidade frente à carbonatação

Em concretos permeáveis, o avanço da carbonatação pode ser influenciado pela elevada conectividade dos poros e pelas condições de umidade do material, fatores que favorecem a difusão do CO_2 . Além disso, a presença de resíduo de caulim pode também interferir nesse processo, em função das alterações promovidas na microestrutura e na composição da matriz cimentícia.

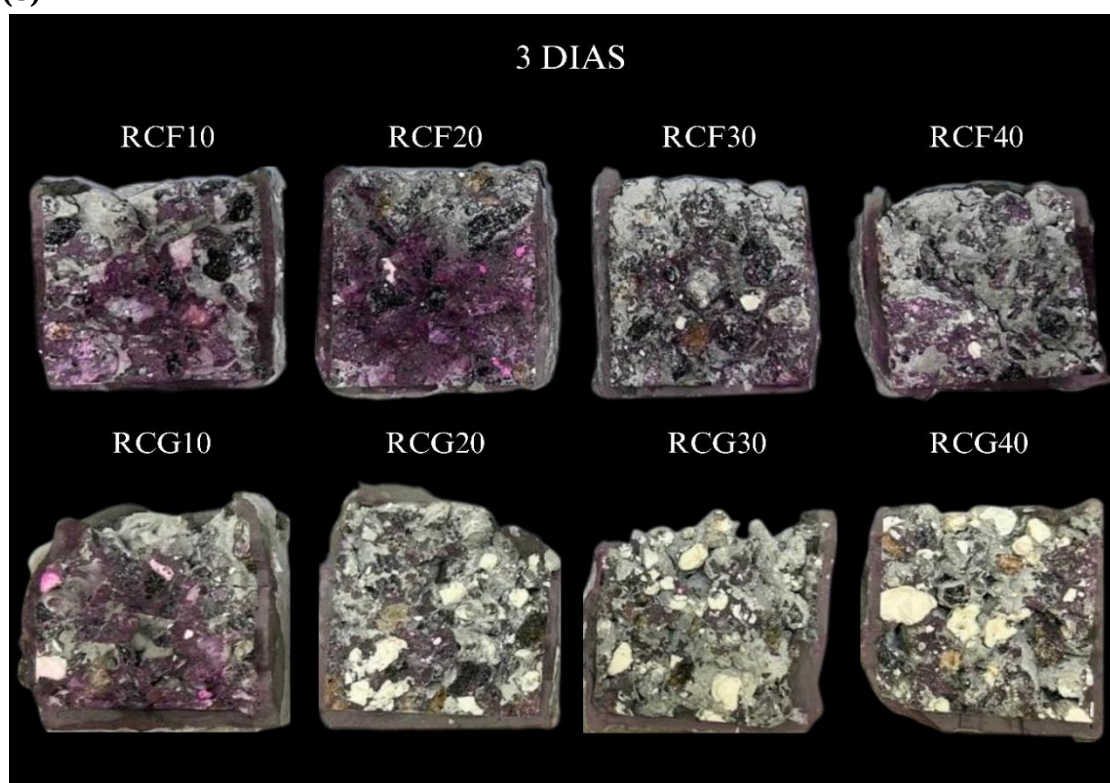
Foi possível verificar a evolução da carbonatação de cada corpo de prova analisado aos 1, 3, 7 e 14 dias com RCF10-40 e RCG10-40, apresentados nas Figuras 4.29a, 4.29b, 4.29c e 4.36d. Percebe-se que a carbonatação ocorreu de forma desuniforme (da parte mais externa para a mais interna) com o passar dos tempos. Além disso, não seguiu um padrão previsto em misturas cimentícias convencionais, devido à rede de macroporos existente em concretos permeáveis.

Figura 4.29 – Evolução da carbonatação nas misturas de concreto permeável contendo RCF e RCG

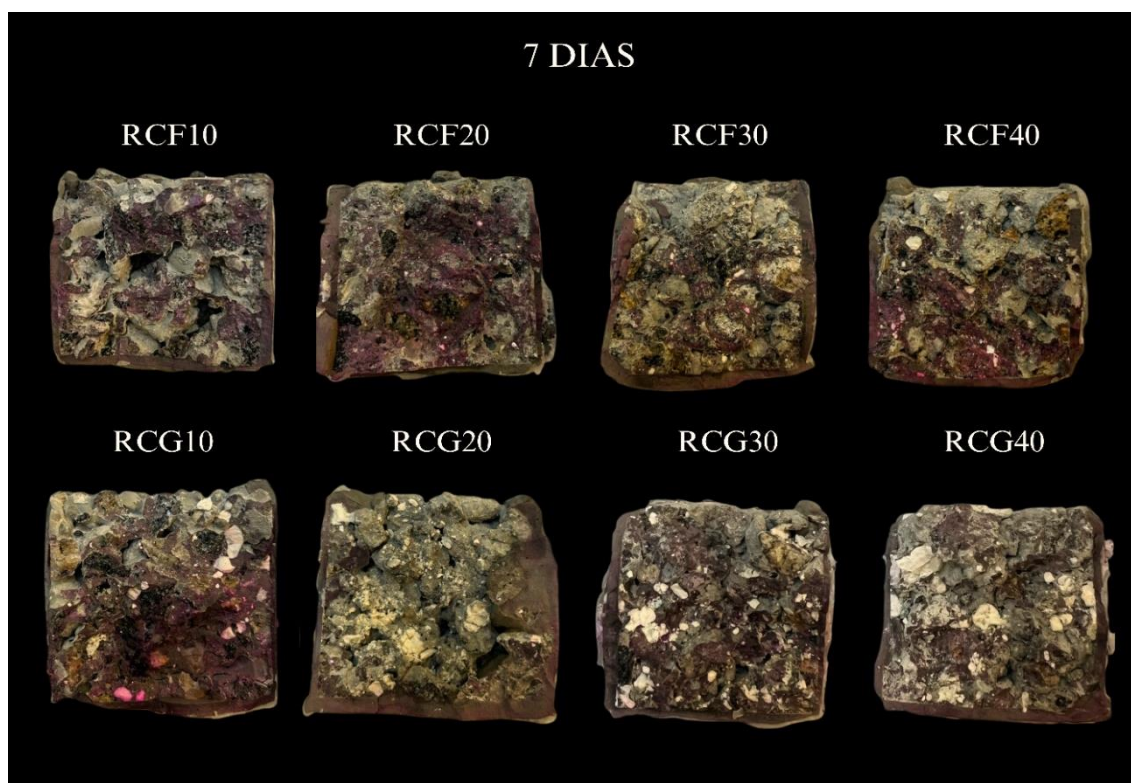
(a)



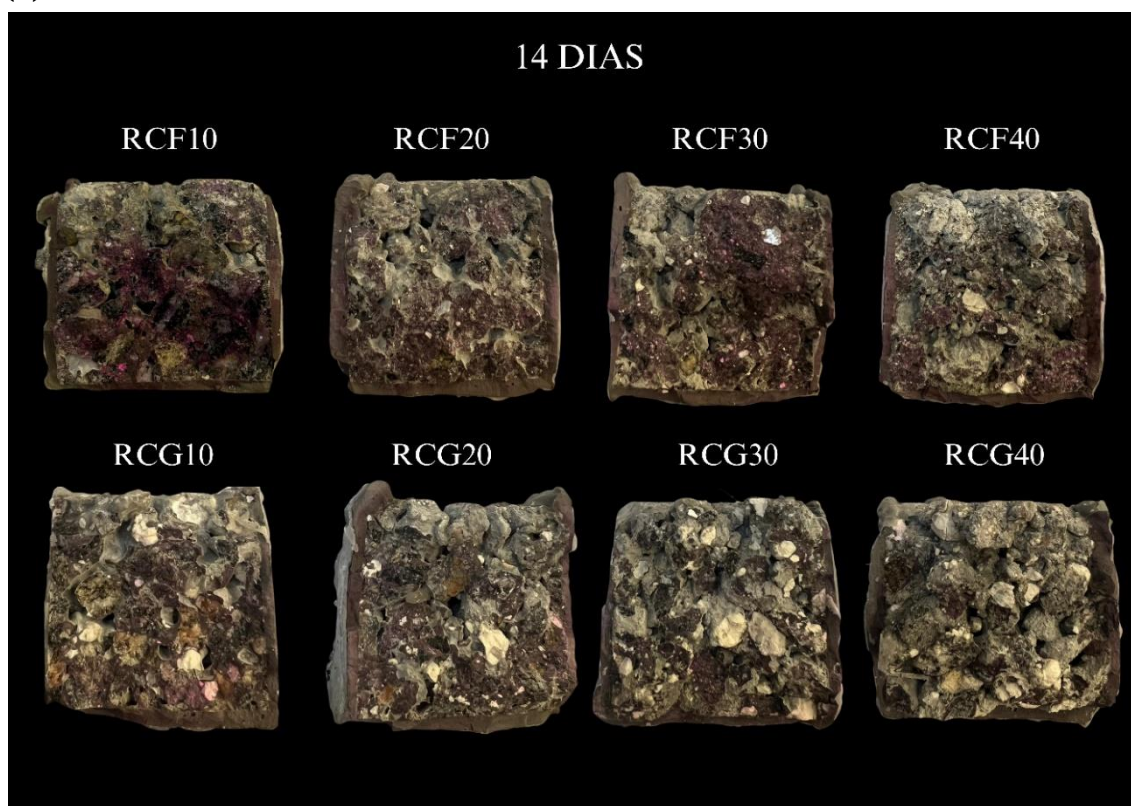
(b)



(c)



(d)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A partir das imagens (Figura 4.29) que apresentam a progressão da carbonatação em função do tempo de exposição ao CO_2 é possível compreender que a penetração do CO_2 ocorreu em todos os vazios, carbonatando toda a região interna do concreto permeável. Essas características foram previstas também nas pesquisas de Merino-Lechuga *et al.* (2024) e Merino-Lechuga *et al.* (2023), que verificaram uma carbonatação mais acelerada para os concretos permeáveis quando comparados aos convencionais. Pela sequência de imagens, percebe-se que o progresso de carbonatação aconteceu de forma quase imediata nas primeiras idades (1, 3 e 7 dias), e posteriormente ocorreu um equilíbrio do processo, visto que a área carbonatada nos 14 dias se configurou praticamente idêntica dos dias iniciais.

Sob a perspectiva funcional, levanta-se ainda a hipótese de que o processo de carbonatação possa influenciar os mecanismos de adsorção do concreto permeável contendo resíduo de caulim, uma vez que alterações no pH, na morfologia superficial e na precipitação de compostos carbonatados podem modificar os sítios ativos de retenção de contaminantes. Entretanto, essa possível interação entre carbonatação e capacidade adsorvente ainda necessita de investigação experimental específica, sendo recomendada como tema para trabalhos futuros.

Essa reação pode potencializar o processo de captura de carbono, passando essa função ao concreto permeável. Além disso, a carbonatação pode ser responsável pela cura por carbonatação e pela redução do processo de vazios capilares pois promove densificação da matriz, no entanto, é um processo que não compromete a permeabilidade, que é governada pelos macroporos. Dessa forma, a carbonatação nos concretos permeáveis pode contribuir de forma positiva no seu processo de cura e captura de carbono.

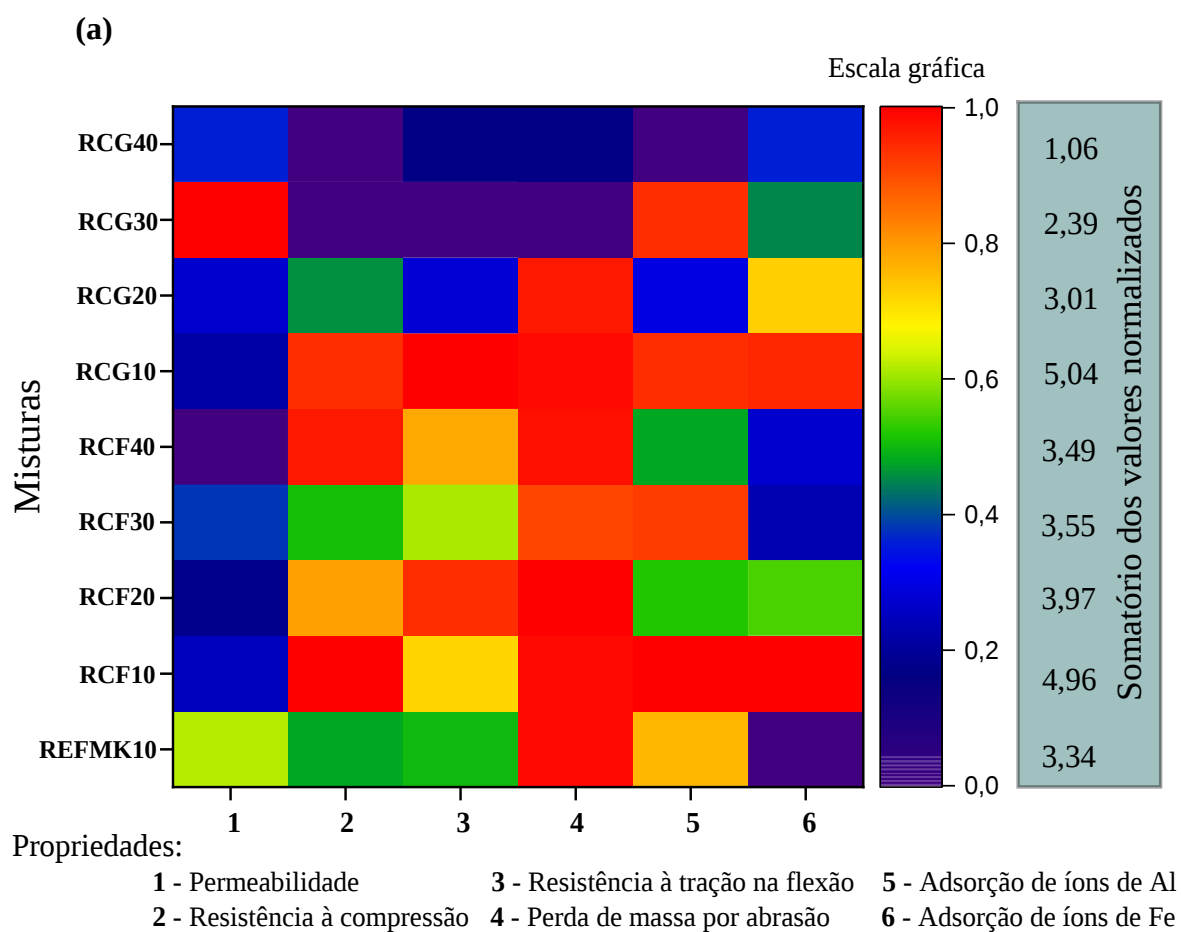
4.4.9 Análise multifuncional

Após a compilação dos resultados, os valores foram normalizados para uma escala adimensional entre 0 e 1, em que 0 indicou o pior desempenho relativo e 1 o melhor desempenho dentro de cada propriedade. Esse procedimento permitiu sintetizar o comportamento global das misturas e compor um termograma (Figura 4.30a), no qual se evidencia a distribuição da eficiência relativa de cada traço frente às propriedades hidráulicas, mecânicas e de adsorção. Tal abordagem proporciona uma leitura integrada da multifuncionalidade dos concretos permeáveis modificados com RCG, RCF e MK.

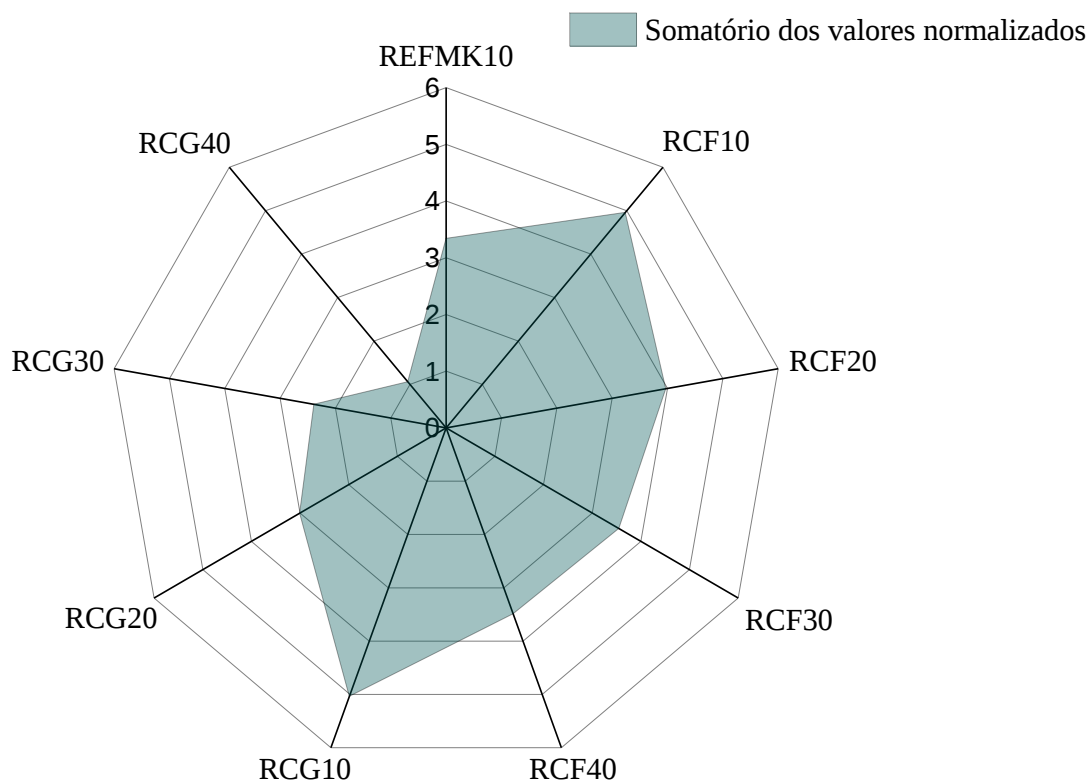
Na sequência, procedeu-se ao somatório das eficiências normalizadas, resultando em um índice acumulado para cada mistura, valores apresentados na coluna em azul (Figura 4.30a). Esse índice permitiu identificar de forma objetiva as misturas com maior equilíbrio e

desempenho global, representadas no gráfico radar da Figura 4.30b. Observa-se que as misturas RCF10 e RCG10 apresentaram os maiores valores acumulados, evidenciando-se como as formulações mais adequadas a cenários que demandam simultaneamente boa permeabilidade, desempenho mecânico intermediário e elevada capacidade de adsorção de íons de alumínio e ferro.

Figura 4.30 – Análise multifuncional das misturas: (a) Heatmap de eficiência relativa das propriedades normalizadas; (b) Gráfico radar do índice acumulado de desempenho



(b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Por fim, a Tabela 4.2 sintetiza as aplicações multifuncionais recomendadas, além dos resultados mais relevantes para as diferentes propriedades analisadas de cada mistura. Dessa forma, é possível sugerir a aplicação do concreto permeável em pavimentos permeáveis considerando diferentes condições de regime pluviométrico, requisitos de desempenho mecânico e demanda por capacidade adsorativa. Essa sistematização reforça o potencial de uso direcionado dos concretos permeáveis com resíduo de caulim, permitindo decisões de projeto baseadas em critérios claros de desempenho integrado (ACI 522R-10, 2010; ABNT NBR 16416, 2015).

Tabela 4.2 – Aplicações multifuncionais e propriedades para diferentes misturas de concretos permeáveis contendo MK, RCF e RCG

Misturas	Aplicações conforme a 522R-06 (ACI, 2010) e NBR 16416 (ABNT, 2015)	Índice de vazios (%)	Permeabilidade Mínima (mm/s)	Resistência à Compressão Máxima (MPa)	Resistência à tração na flexão máxima (MPa)	Perda de massa por abrasão máxima (%)	Adsorção de íons de Al (%) – 48 h	Adsorção de íons de Fe (%) – 48h
REFMK10	Pavimentos de baixa carga ou de uso pedestre, apresentando permeabilidade intermediária e alta capacidade de adsorção de alumínio presente em águas contaminadas.	16,8-17,4	7,1-8,1	4,9-5,5	2,4-4,1	1,6-7,4	69,51	82,86
RCF10	Pavimentos de baixa carga ou de uso pedestre, apresentando baixa permeabilidade e alta capacidade de adsorção de alumínio e ferro presentes em águas contaminadas.	16,8-17,4	2,7-3,9	7,5-9,2	4,5	1,6-3,9	75	78,57
RCF20	Pavimentos de baixa carga ou de uso pedestre, apresentando baixa permeabilidade e capacidade intermediária de adsorção de alumínio e ferro presentes em águas contaminadas.	18,3-18,4	1,7-2,8	5,6-7,7	4,8-4,9	1-3,9	71,95	84,29
RCF30	Pavimentos de baixa carga ou de uso pedestre, apresentando permeabilidade intermediária e capacidade de adsorção de alumínio alta e de ferro intermediária presentes em águas contaminadas.	18,2-19	5,0-5,3	3,7-5,7	3,7-4,3	4,9-5,5	71,95	85,71

Misturas	Aplicações conforme a 522R-06 (ACI, 2010) e NBR 16416 (ABNT, 2015)	Índice de vazios (%)	Permeabilidade Mínima (mm/s)	Resistência à Compressão Máxima (MPa)	Resistência à tração na flexão máxima (MPa)	Perda de massa por abrasão máxima (%)	Adsorção de íons de Al (%) – 48 h	Adsorção de íons de Fe (%) – 48h
RCF40	Pavimentos de baixa carga ou de uso pedestre, apresentando baixa permeabilidade e capacidade intermediária de adsorção de alumínio e ferro presentes em águas contaminadas.	16,4-18,1	1,0-1,2	7-9	4,3-4,6	1,7-2,2	72	90
RCG10	Pavimentos de baixa carga ou de uso pedestre, apresentando baixa permeabilidade e alta capacidade de adsorção de alumínio e ferro presentes em águas contaminadas.	18,2-19	3,3-4,8	8,2-8,8	5	1,5-2,6	75	85,71
RCG20	Pavimentos de baixa carga ou de uso pedestre, apresentando permeabilidade intermediária e alta capacidade de adsorção de ferro presente em águas contaminadas.	16,6-17,8	3,7-4,0	5-5,4	3,6-3,7	2,3-3	71,34	84,29
RCG30	Pavimentos de resistência mecânica limite, apresentando alta permeabilidade e alta capacidade de adsorção de alumínio presentes em águas contaminadas.	19-19,3	9,3-9,8	1,9-2,1	3-3,2	43-49,6	74,39	90
RCG40	Pavimentos de resistência mecânica limite, apresentando alta permeabilidade e baixa capacidade de adsorção.	18,5-21,2	4,5-4,6	2-2,1	3,5	35,8-52,8	69,51	85,71

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

4.4.10 Valorização dos resíduos de caulim

Além da multifuncionalidade, a incorporação de resíduos de caulim nas frações grossa e fina em misturas de concretos permeáveis contribui para a valorização desses resíduos e para sua economia circular, alinhando-se aos critérios estabelecidos pelos ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e 12 (Consumo e Produções Responsáveis) (United Nations, 2015).

De acordo com o levantamento realizado durante visita técnica a uma indústria de beneficiamento de caulim localizada no estado da Paraíba, são geradas aproximadamente 8 t/dia de resíduos de caulim, o que corresponde a cerca de 2.920 t/ano. Vale salientar a existência de um número de indústrias não catalogadas; nesse contexto, a quantidade da produção diária de resíduos que são depositados sem seleção entre a fração fina (RCF) e grossa (RCG) pode ser significativamente superior aos valores utilizando dados oficiais.

Sabe-se que as misturas desenvolvidas neste estudo permitem incorporar entre 132,7 e 530,9 kg de resíduos de caulim por metro cúbico de concreto (Tabela 3.6), valores correspondentes aos teores de adição de 10% e 40% do RCF ou RCG, respectivamente. Nessas condições, foi realizada uma estimativa de reaproveitamento integral da geração diária de resíduos de uma indústria de beneficiamento de caulim específica, conforme apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Cenário de incorporação do resíduo de caulim em concreto permeável para uma geração diária de 8 t

Mistura	Resíduo incorporado (kg/m³)	m³ necessários para consumir 8 t/dia
RCF10 e RCG10	132,72	60,3
RCF20 e RCG20	265,44	30,1
RCF30 e RCG30	398,16	20,1
RCF40 e RCG40	530,88	15,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Embora essas estimativas estejam baseadas em um cenário hipotético e não substituam avaliações mais abrangentes, como estudos de Análise do Ciclo de Vida (ACV), o levantamento de dados demonstra que a utilização de resíduos de caulim (RCF e RCG) em concretos permeáveis constitui uma alternativa para a valorização desse passivo ambiental. Ademais, considerando que a análise multifuncional indicou as misturas RCF10 e RCG10 como aquelas de melhor equilíbrio entre desempenho hidráulico, mecânico e adsorativo, os resultados sugerem que é possível conciliar elevados níveis de desempenho com o reaproveitamento significativo de resíduos, contribuindo para estratégias de economia circular.

4.4.11 Redução das emissões de CO₂

Outro benefício ambiental associado às misturas desenvolvidas refere-se à substituição parcial do cimento por metacaulim. Em todas as formulações estudadas foi adotada uma substituição de 10% da massa de cimento por metacaulim (Tabela 3.6).

A quantidade de cimento utilizada nas misturas RCF10–RCF40 e RCG10–RCG40 foi de 398,2 kg/m³. Considerando uma substituição de 10% da massa de cimento por metacaulim, a quantidade de cimento substituída em cada metro cúbico de concreto é igual a 39,82 kg de cimento Portland.

De acordo com Agência Internacional de Energia (IEA), as emissões de dióxido de carbono associadas à produção de cimento Portland chegam em média igual 0,52 kg CO₂ por quilograma de cimento produzido, dados mais recentes obtidos no ano de 2022. Adotando-se esse valor de CO₂/kg de cimento, a redução potencial de emissões por metro cúbico do concreto permeável estudado foi estimada pela Equação (3).

$$\text{Redução de CO}_2 \text{ por m}^3 = 39,82 \times 0,52 = 20,70 \text{ CO}_2/\text{m}^3 \quad (3)$$

Portanto, a substituição parcial do cimento por metacaulim proporciona uma redução estimada de 20,70 kg de CO₂ para cada metro cúbico de concreto produzido.

A Tabela 4.4 apresenta a quantidade de CO₂ em kg que pode ser evitada de ser emitida por dia e por ano, caso seja utilizado todo o volume de resíduo de caulim produzido diariamente, com produções todos os dias do ano.

Tabela 4.4 – Estimativa da mitigação de emissões de CO₂ decorrente da substituição parcial do cimento por metacaulim nos concretos permeáveis estudados

Parâmetros Gerais			
Cimento de referência		398,2 kg/m ³	
Metacaulim incorporado		39,82 kg/m ³	
Cimento evitado		39,82 kg/m ³	
Fator de emissão adotado		0,52 kg CO ₂ /kg cimento	
CO ₂ evitado		20,70 kg CO ₂ /m ³	
Mistura	Volume para absorver 8 t/dia (m ³ /dia)	CO ₂ evitado (kg/dia)	CO ₂ evitado (t/ano)
RCF10 e RCG10	60,3	1,248	455,5
RCF20 e RCG20	30,1	0,623	227,4
RCF30 e RCG30	20,1	0,416	151,8
RCF40 e RCG40	15,1	0,313	114,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

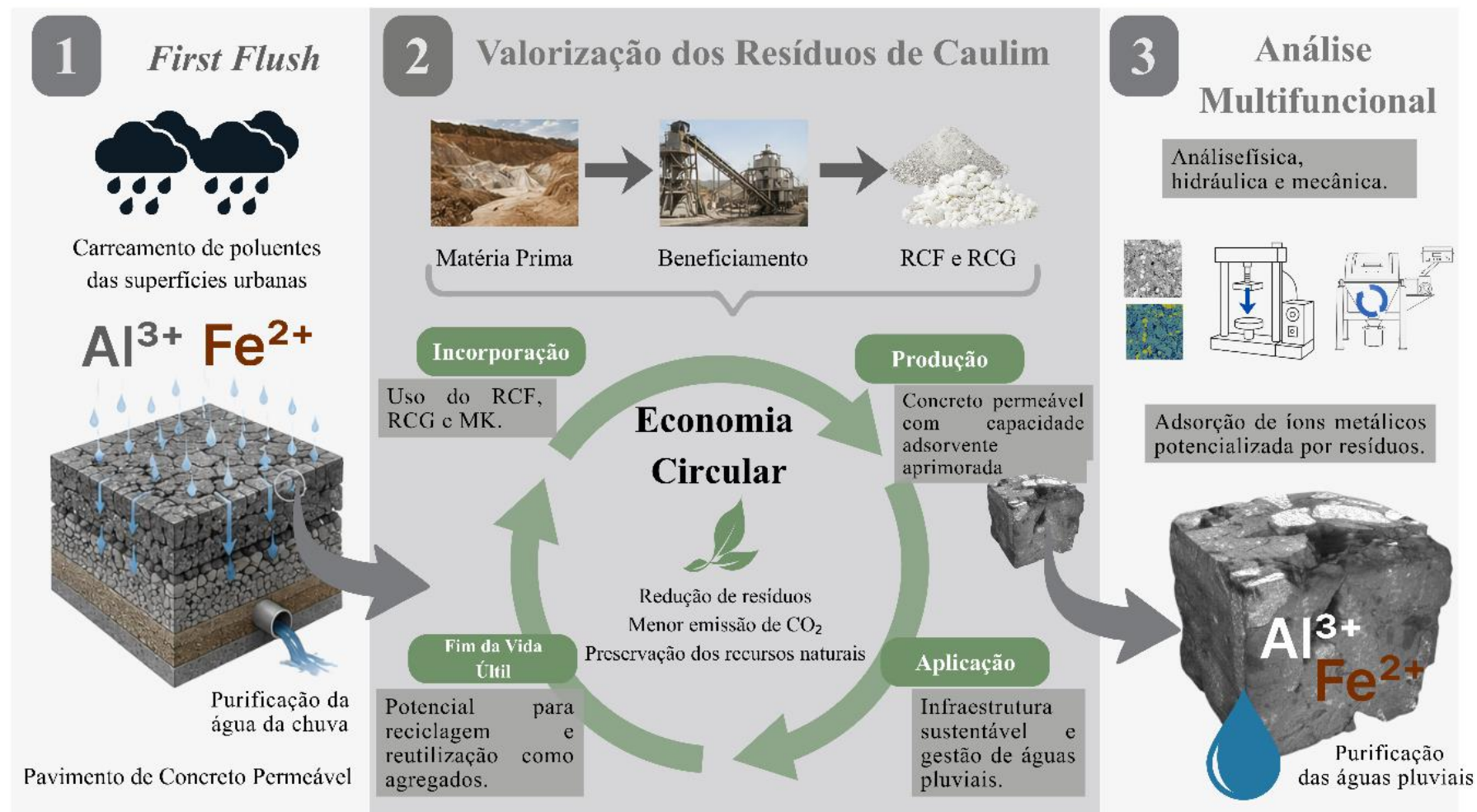
Os resultados evidenciam que os concretos permeáveis estudados associam duas estratégias complementares de sustentabilidade: (i) a valorização de resíduos de caulim, reduzindo a necessidade de disposição final desses materiais, e (ii) a redução do consumo de cimento Portland, cuja a produção é responsável por parte emissões de CO₂, responsáveis pelo efeito estufa.

Diante do panorama apresentado, esta tese se insere de forma inédita no campo dos concretos permeáveis ao propor a combinação do metacaulim como material cimentício suplementar e de resíduos de caulim, nas frações finas (RCF) e grossas (RCG), como materiais funcionais capazes de englobar simultaneamente em um mesmo material, desempenho mecânico, hidráulico e ambiental, caracterizando a multifuncionalidade do concreto permeável em estudo. Além disso, reforça o potencial dos concretos desenvolvidos como materiais alinhados aos princípios da economia circular e da infraestrutura sustentável.

Embora as estimativas apresentadas nesta pesquisa indiquem benefícios ambientais decorrentes da redução do consumo de cimento Portland e do reaproveitamento de resíduos de caulim, esses ganhos podem ser avaliados por uma Análise do Ciclo de Vida (ACV). Nesse contexto, estudos futuros poderão quantificar os impactos relacionados à extração da matéria-prima, ao consumo energético, ao transporte, à produção dos materiais e às possibilidades de reaproveitamento ao final do ciclo de vida, fornecendo uma avaliação dos benefícios ambientais associados aos concretos permeáveis estudados.

Por fim, a Figura 4.31 apresenta um resumo gráfico com o objetivo de sintetizar os principais aspectos abordados nesta pesquisa e as contribuições alcançadas.

Figura 4.31 – Resumo gráfico da pesquisa considerando as principais fases: 1 – First Flush em contato direto com o pavimento permeável; 2 – Valorização dos resíduos de caulim e economia circular; 3 – Análise multifuncional do concreto permeável



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Este estudo investigou as propriedades físicas, hidráulicas, mecânicas, adsorptivas frente a íons metálicos de alumínio e ferro e durabilidade frente à carbonatação de concretos permeáveis com incorporação de metacaulim e resíduos de caulim nas frações finas (RCF) e grossas (RCG). Foi possível estabelecer, após a análise de um termograma multifuncional que as misturas RCF10 e RCG10 alcançaram o melhor equilíbrio global entre desempenho hidráulico, mecânico e adsorptivo. As principais conclusões estão listadas a seguir:

- Na análise da matriz de pasta cimentícia, foi constatado que, em idades avançadas, as substituições de 10% de metacaulim em relação à massa de cimento apresentaram os melhores desempenhos mecânicos.
- No estudo dos concretos, referências às propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas se apresentaram de forma equilibrada para as misturas que continham 10% de metacaulim em substituição à massa de cimento (REFMK10), favorecendo a diminuição do consumo de cimento;
- A partir da análise por imagens, percebeu-se que o sistema de poros nas misturas de concretos permeáveis com RCF e RCG apresentou uma distribuição equilibrada de poros finos e intermediários, sustentando o comportamento mecânico e hidráulico observado no estudo.
- A permeabilidade mostrou-se altamente sensível tanto ao teor quanto à morfologia do resíduo de caulim. Embora as misturas com RCF tenham apresentado reduções associadas ao refinamento dos vazios, todas mantiveram valores compatíveis com pavimentos permeáveis de baixo tráfego.
- A adição de resíduo de caulim (RCF e RCG) a 10% favoreceu o empacotamento granular e promoveu o refinamento parcial da estrutura porosa, resultando em aumento da resistência à flexão. Entretanto, teores mais elevados de RCG (30–40%) reduziram o desempenho mecânico e aumentaram a perda de massa por abrasão.
- As imagens microscópicas da superfície do concreto permeável permitiram identificar a superfície rugosa e irregular como pontos de ancoragem que podem potencializar a adsorção de íons de alumínio e ferro presentes em águas contaminadas.

- A microtomografia computadorizada por raios X (micro-CT) caracterizou de forma eficaz a estrutura interna do concreto permeável, confirmando uma microestrutura densa e bem compactada, com dispersão homogênea do resíduo de caulim e interfaces bem definidas entre as três fases principais.
- A porosidade conectada e a rugosidade interna desempenharam papel fundamental na promoção da retenção progressiva de íons metálicos, reforçando o caráter multifuncional dos concretos permeáveis que contêm RCF e RCG.
- As misturas modificadas com adição de RCF e RCG apresentaram elevado desempenho adsorativo, especialmente nas primeiras horas de contato, com remoções iniciais de metais variando entre 25–48% e estabilização entre 70–90% após 48 h, evidenciando seu potencial para o tratamento passivo de águas pluviais contaminadas.
- A carbonatação nos concretos permeáveis acompanhou o caminho dos poros conectados, procedeu de forma acelerada nas primeiras idades (1, 3 e 7 dias) e em seguida se estabeleceu aos 14 dias;
- De modo geral, concluiu-se que o ajuste do teor de resíduo de caulim permite adequar o desempenho do material a diferentes aplicações, priorizando a permeabilidade ou a adsorção, conforme a necessidade.
- Sob a perspectiva da economia circular, a incorporação do resíduo de caulim (RCF e RCG) em concretos permeáveis valoriza subprodutos industriais, reduz a destinação inadequada de resíduos e a demanda por matérias-primas naturais, promovendo o fechamento do ciclo de materiais e o alinhamento aos princípios da sustentabilidade e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar estudos em concreto permeável contendo proporções de RCF e RCG na mesma mistura;
- Analisar a adsorção dos concretos permeáveis com resíduos de caulim para outros íons metálicos, a exemplo do cádmio (Cd^{2+}), cobre (Cu^{2+}) e chumbo (Pb^{2+});
- Realizar análises da potencialidade da retenção de microplásticos nos concretos permeáveis estudados;
- Estudar a capacidade multifuncional dos concretos permeáveis estudados após sofrerem carbonatação e saturação da adsorção;

- Investigar a possível regeneração da capacidade adsorvente do concreto permeável ao longo do tempo.
- Propor o estudo da análise do ciclo de vida do material e da sua capacidade de captura de carbono;
- Propor um protótipo de pavimento permeável com utilização do concreto permeável estudado e verificar a sua funcionalidade com águas pluviais (*in situ*), proposta de manutenção e vida útil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A UNIÃO. João Pessoa acumula 413,2 mm, 46% acima da média histórica. João Pessoa, 14 maio 2026. Disponível em: https://auniao.pb.gov.br/noticias/caderno_paraiba/joao-pessoa-acumula-413-2-mm-46-acima-da-media-historica. Acesso em: 23 maio 2026.

ABEDI-KOUPAI, J.; TEHRANI, M. J.; BEHFARNIA, K. Improvement the quality of wastewater using porous concrete for irrigation. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, v. 19, n. 71, p. 93-107, 2015. DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.71.93

ADAB, H.; ABBASI, M. Enhancing runoff treatment using green porous concrete incorporating recycled aggregates. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 21, n. 16, p. 9853-9866, 2024. DOI: 10.1007/s13762-024-05692-8.

ADRESI, M.; YAMANI, A.; KARIMAEI TABARESTANI, M.; ROOHOLAMINI, H. A comprehensive review on pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 407, 133308, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133308.

AHMADI, Z.; BEHFARNIA, K.; FAGHIHIAN, H.; SOLTANINIA, S.; BEHRAVAN, A.; AHMADI, S. Application of pervious alkali-activated slag concrete to adsorb runoff contaminants. *Construction and Building Materials*, v. 375, 130998, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130998.

AHMED, M. M.; ISMAIL, M. K.; ELBAYOMY, M. S.; IBRAHIM, H. H. A. Recycling crushed clay bricks for use in pervious concrete: mechanical and hydraulic characteristics, clogging behavior, and maintenance. *Construction and Building Materials*, v. 491, 142801, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142801.

ALHINQARI, W. S.; IKREDEDEGH, R. R.; BAGANÉ, M.; ELSHEBANI, A. M.; KAZOURI, A. M. A.; TAHIR, M. Kaolin/metakaolin-based adsorbent geopolymer for efficient removal of Cd, Cr, and Ni heavy metals. *Journal of Umm Al-Qura University Applied Sciences*, 2025. DOI: 10.1007/s43994-025-00281-y.

ALVES, P. B. Concreto permeável para pavimentação urbana com uso de resíduos de construção e demolição produzidos na usina de reciclagem de São José do Rio Preto. 2016. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/138535>. Acesso em: 7 jun. 2026.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 522R–10: Report on pervious concrete. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2010.

ANDRADE, L. B. de. Análise das propriedades de argamassas no estado fresco e endurecido utilizando resíduo de caulim. 2019. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/23582>. Acesso em: 7 jun. 2026.

APHA; AWWA; WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2017. Method 3500-AI B.

AQUINO, S. M. de; LARANJEIRA, L. F. Estudo da utilização de resíduo de caulim nas propriedades do concreto permeável (poroso). In: IFPB INNOVATION AND POSTGRADUATE RESEARCH SYMPOSIUM, 3., 2019. João Pessoa: IFPB, 2019. p. 1-11.

ARAÚJO, W. M. P.; ALMEIDA-SILVA, H. D.; PEÑA-GARCIA, R.; MACEDO, A. N.; CASTRO-LOPES, S. Performance of geopolymer pervious concrete using red ceramic waste as a partial substitute for metakaolin. *Construction and Building Materials*, v. 505, 144509, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.144509.

ARRUDA, E. S. de; SILVA, A. B. da; MENEZES, R. R.; NEVES, G. de A. The use of red mud and kaolin waste in the production of a new building material: pozzolanic pigment for colored concrete and mortar. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 27, n. 3, e20220149, 2022. DOI: 10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0149.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11582: cimento Portland — determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16416: pavimentos de concreto permeável — requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: cimento Portland — requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16889: concreto — determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: concreto — procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: concreto — ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: agregados para concreto — especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: argamassa e concreto endurecidos — determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: agregado miúdo — determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM C150/C150M-22: standard specification for Portland cement. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

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

ASTM INTERNATIONAL. ASTM C305/C305M-14: standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.

AYALEW, A. A.; DEMIR, I. Physiochemical characterization of Ethiopian mined kaolin clay through beneficiation process. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2023, art. 9104807, 2023. DOI: 10.1155/2023/9104807.

AZAD, A.; MOUSAVI, S.-F.; KARAMI, H.; FARZIN, S.; REZAIFAR, O.; KHEYRODDIN, A.; SINGH, V. P. Properties of metakaolin-based green pervious concrete cured in cold and normal weather conditions. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, v. 26, n. 16, p. 7627-7646, 2022. DOI: 10.1080/19648189.2020.1749942.

AZAD, A.; SHEIKH, M. N.; HAI, F. I. Adsorption of heavy metals onto alkali-activated pervious concrete: mechanism, long-term performance, and leaching behaviour. *Science of the Total Environment*, v. 1007, p. 180936, 2025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.180936.

AZANFIRE, B.-E.; BULGARIU, D.; CIMPOEȘU, N.; BULGARIU, L. Efficient removal of toxic heavy metals on kaolinite-based clay: adsorption characteristics, mechanism and applicability perspectives. *Water*, v. 17, n. 13, p. 1938, 2025. DOI: 10.3390/w17131938.

AZERÊDO, A. F. N. Estudo do resíduo de caulim em argamassas à base de cal quanto às suas propriedades no estado fresco, endurecido e microestruturais. 2012. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/13873>. Acesso em: 7 jun. 2026.

BA, Y.; LI, X.; LI, Y.; LI, J. Effects of CO₂ curing on the properties of pervious concrete with different paste-aggregate ratios. *Materials*, v. 16, n. 13, p. 4581, 2023. DOI: 10.3390/ma16134581.

BAI, X.; ZHOU, H.; BIAN, X.; CHEN, X.; REN, C. Compressive strength, permeability, and abrasion resistance of pervious concrete incorporating recycled aggregate. *Sustainability*, v. 16, n. 10, p. 4063, 2024. DOI: 10.3390/su16104063.

BATEZINI, R. Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves. 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-19072013-155819/>. Acesso em: 7 jun. 2026.

BATEZINI, R.; BALBO, J. T.; HASELBACH, L.; CURVO, F. de O.; KALLEDER, G. N.; SATO, B. S.; ZEMA, D. Experimental appraisal for characterizing laboratorial and field performance parameters of pervious concrete pavement. *Ambiente Construído*, v. 21, n. 2, p. 177-194, 2021. DOI: 10.1590/s1678-86212021000200520.

BAUER, A. L.; EHRENBRING, H.; SCHNEIDER, D.; QUININO, U. C. M.; TUTIKIAN, B. Evaluation of the impact of two types of steel fibers (SE), mono and 3D, on concrete properties, when added isolated or blended. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 13, n. 3, p. 464-482, 2020. DOI: 10.1590/S1983-41952020000300002.

BBC NEWS. Spain faces tragedy after torrential rains and floods. 2025. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/articles/cn8gzpppzjlo>. Acesso em: 22 dez. 2025.

BENEVEUTO, A. Permeable concrete: UFF researches solutions for sustainable urbanization. 2018. Disponível em: <https://www.uff.br/?q=noticias/15-08-2018/concreto-permeavel-uff-pesquisa-solucoes-para-uma-urbanizacao-sustentavel>. Acesso em: 22 dez. 2025.

BHATTACHARYYA, K. G.; GUPTA, S. S. Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: a review. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 140, n. 2, p. 114–131, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2007.12.008>.

BILAL, H.; CHEN, T.; REN, M.; GAO, X.; SU, A. Influence of silica fume, metakaolin and SBR latex on strength and durability performance of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 275, p. 122124, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122124.

BITTENCOURT, S. V.; MAGALHÃES, M. da S.; TAVARES, M. E. da N. Mechanical behavior and water infiltration of pervious concrete incorporating recycled asphalt pavement aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, v. 14, e00473, 2021. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00473.

BOAKYE, K.; KHORAMI, M. Influence of calcined clay pozzolan and aggregate size on the mechanical and durability properties of pervious concrete. *Journal of Composites Science*, v. 7, n. 5, p. 182, 2023. DOI: 10.3390/jcs7050182.

BOKADE, M. S.; SINGH, D. N. Discussion on “Pollution mitigation in urban runoff via fully recycled-aggregate pervious concrete incorporating bauxite residue and rice husk biochar”. *Construction and Building Materials*, v. 505, p. 144708, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.144708.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria Nacional de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Caderno 2: pesquisa e produção mineral: estudos e documentos técnicos do Plano Nacional de Mineração 2050. v. 2. Brasília: MME, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pnm-2050/ESTUDOS%20E%20DOCUMENTOS%20TECNICOS/caderno-2-pesquisa-e-producao-mineral/EstudosMSWordPNM2050Caderno220221116_Vol.II.pdf. Acesso em: 27 jan. 2026.

BUALUANG, T.; CHUSAI, N.; PORNINTA, K.; RATTANASAK, U.; KUA, H. W. Corn waste-derived biochar as a sustainable fine aggregate in pervious concrete for climate-resilient urban pavement applications. *Developments in the Built Environment*, v. 23, p. 100735, 2025. DOI: 10.1016/j.dibe.2025.100735.

CAI, J.; CHEN, J. G.; SHI, J.; TIAN, Q.; XU, G.; DU, Y. A new approach to evaluate the clogging resistance of pervious concrete. *Case Studies in Construction Materials*, v. 16, e00864, 2022. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00864.

CAI, X.; WU, K.; HUANG, W.; YU, J.; YU, H. Application of recycled concrete aggregates and crushed bricks on permeable concrete road base. *Road Materials and Pavement Design*, v. 22, n. 10, p. 2181-2196, 2021. DOI: 10.1080/14680629.2020.1742193.

CAMPOS, V. M. J. S.; BERTOLINO, L. C. Caracterização mineralógica e tecnológica do caulim da região de Junco do Seridó (PB). In: JORNADA DO PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO INTERNA DO CETEM, 2015, Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), 2015. Disponível em: <https://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1784/1/Victor%20Matheus%20Joaquim%20Salgado%20Campos.pdf>. Acesso em: 31 maio 2026.

CANDIAN FILHO, E. L.; REIS, M.; PEREIRA, G. *et al.* Permeable concrete with discarded foundry sand: mechanical and hydraulic properties. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 27, n. 1, e20220135, 2022. DOI: 10.1590/S1517-707620220001.1354.

CHAITANYA, M.; RAMAKRISHNA, G. Improvement of mechanical properties of pervious concrete with recycled aggregate through the addition of silica fume. *Materials Today: Proceedings*, v. 46, n. 1, p. 634-637, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.549.

CHEN, B.; ZHANG, X.; WANG, X.; ZHANG, F.; LV, L.; BAI, Y.; MA, H. Permeability and compressive strength of pervious cement concrete with small size aggregates. In: *Advances in Frontier Research on Engineering Structures II*. Singapore: Springer, 2024b. p. 161-168. (Lecture Notes in Civil Engineering, v. 535). DOI: 10.1007/978-981-97-6238-5_13.

CHEN, J. J.; NG, P. L.; CHU, S. H.; GUAN, G. X. Ternary blending with metakaolin and silica fume to improve packing density and performance of binder paste. *Construction and Building Materials*, v. 252, p. 119031, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119031.

CHEN, L.; REN, B.; DENG, X.; YIN, W.; XIE, Q.; CAI, Z. Potential toxic heavy metals in village rainwater runoff of an antimony mining area, China: distribution, pollution sources, and risk assessment. *Science of the Total Environment*, v. 920, p. 170702, 2024a. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170702.

CHOUKSEY, A.; DEV, N.; KANTARAO, V. V. L. Advancing sustainable concrete through lime sludge and metakaolin for reduced energy consumption and waste valorisation. *Scientific Reports*, v. 15, art. 44487, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-28144-w.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. CEN/TS 12390-12: testing hardened concrete – part 12: determination of the carbonation resistance of concrete – accelerated carbonation method. Brussels: CEN, 2010.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. EN 12390-5: testing hardened concrete – part 5: flexural strength of test specimens. Brussels: European Committee for Standardization, 2009.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. EN 197-1: cement – part 1: composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brussels: European Committee for Standardization, 2011.

COSTA, F. B. P.; LORENZI, A.; HASELBACH, L.; SILVA FILHO, L. C. P. Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 11, n. 5, p. 1151-1159, 2018. DOI: 10.1590/S1983-41952018000500013.

DASSOLER, L. F.; LANGOSKI, M.; CASANOVA, R. F. Análise da influência do uso do metacaulim de alta reatividade (MAR) nas propriedades mecânicas de concretos autoadensáveis (CAA). In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DAS CONSTRUÇÕES, 17., 2021, Fortaleza. Fortaleza: CINPAR, 2021. DOI: 10.4322/CINPAR.2021.026.

DE LA COLINA MARTÍNEZ, A. L.; DELGADO-HERNÁNDEZ, D. J.; ARTEAGA-ARCOS, J. C.; DÍAZ CAMACHO, S. A.; UREÑA-NÚÑEZ, F. Using recycled e-waste microplastics to improve the environmental and functional performance of permeable concrete: a TOPSIS and VIKOR analysis. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 28, p. 490–509, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-025-02429-8>.

DE SOUSA, C. A. F.; DA SILVEIRA, J. A. R.; SANTOS, C. A. G.; DA SILVA, R. M. A methodological proposal to analyze urban sprawl, negative environmental impacts, and land degradation in the case of João Pessoa City (Brazil) between 1991 and 2018. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 195, n. 6, p. 738, 2023. DOI: 10.1007/s10661-023-11325-3.

DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. Characterization of pervious concrete using overburnt brick as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 242, p. 118154, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118154.

DELNAVAZ, M.; BECHRAK, T.; NAJARI, S.; SHIRGIR, B. Enhancing stormwater runoff quality through porous concrete: characteristics, absorption isotherms and statistical analysis. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, v. 9, p. 27, 2024. DOI: 10.1007/s41024-023-00379-y.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 383/99: concrete for rigid pavements. Brasília: DNER, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ME 425: agregados – determinação do índice de forma. Rio de Janeiro: DNIT, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ME 451: agregados – determinação da resistência à abrasão. Rio de Janeiro: DNIT, 2024.

DIAS, A. R. O.; AMANCIO, F. A.; SOUSA, I. L. X. de; LUCAS, S. O.; LIMA, D. A.; CABRAL, A. E. B. Efeitos da substituição do cimento Portland por escória de aciaria BSSF

nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 25, n. 4, e12890, 2020. DOI: 10.1590/S1517-707620200004.1190.

DOOSTMOHAMADI, M.; KARAMI, H.; FARZIN, S.; MOUSAVI, S. F. Improving the performance of porous concrete composites using zeolite as a coarse grain. *Mechanics of Advanced Composite Structures*, v. 5, p. 157-163, 2018. DOI: 10.22075/MACS.2018.13363.1131.

EL-HASSAN, H.; KIANMEHR, P.; ZOUAOUI, S. Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag. *Construction and Building Materials*, v. 212, p. 164-175, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.325.

ELIZONDO-MARTÍNEZ, E. J.; TATARANNI, P.; RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, J.; CASTRO-FRESNO, D. Physical and mechanical characterization of sustainable and innovative porous concrete for urban pavements containing metakaolin. *Sustainability*, v. 12, n. 10, p. 4243, 2020. DOI: 10.3390/su12104243.

FANG, C.; CUI, X.; LI, G.; BAO, C.; WANG, Z.; MA, H. *et al.* Modeling regional sustainable development scenarios using the Urbanization and Eco-environment Coupler: case study of the Beijing–Tianjin–Hebei urban agglomeration, China. *Science of the Total Environment*, v. 689, p. 820-830, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.430.

FARIA, A. da C. Pavimento de concreto drenante: estudo da granulometria que favorece a drenagem e que afete o mínimo da resistência. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 33., 2019, Balneário Camboriú. ANPET, 2019. p. 1-12.

FEI, M.; LUO, C.; ZHENG, X.; FU, T.; LING, K.; CHEN, H.; LIU, W.; QIU, R. High-performance pervious concrete using cost-effective modified vinyl ester as a binder. *Construction and Building Materials*, v. 414, p. 134908, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134908.

FERNANDES, W. E. H. Concreto permeável para aplicação em pavimentação intertravada a partir de concreto de pós reativos – CPR. 2019. 84 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/25749>. Acesso em: 7 jun. 2026.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. Manual prático de análise de água. 4. ed. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2013.

GEU, M. J.; ZHUGE, Y.; MA, X.; PHAM, T. M. Systematic review of physical, mechanical and durability performance of metakaolin concrete. *Applied Clay Science*, v. 279, p. 108048, 2025. DOI: 10.1016/j.clay.2025.108048.

GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, M. A.; GÓMEZ-SOBERÓN, J. M.; LEAL-CASTAÑEDA, E. J. Permeable concrete with recycled aggregates: study of its mechanical and microstructural properties. *Materials*, v. 18, n. 4, p. 770, 2025. DOI: 10.3390/ma18040770.

HOU, J.; MAO, H.; LI, J.; SUN, S. Spatial simulation of ecological stormwater processes for sponge cities. *Journal of Environmental Management*, v. 232, p. 574-583, 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.11.111.

HUA, M.; CHEN, B.; LIU, Y.; LIU, H.; ZHU, P.; CHEN, C.; WANG, X. Durability and abrasion resistance of innovative recycled pervious concrete with recycled coarse aggregate of different quality under sulfate attack. *Applied Sciences*, v. 11, n. 20, p. 9647, 2021. DOI: 10.3390/app11209647.

HUANG, G.; LIU, Y.; BENN, T.; SU, J.; ZHUGE, Y. Production and quality control of calcined clay for cementitious applications. *Structures*, v. 80, p. 111851, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2026.111851>.

IBRAHIM, H. A.; GOH, Y.; NG, Z. A.; YAP, S. P.; MO, K. H.; YUEN, C. W.; ABUTAHA, F. Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing high volumes of construction and demolition waste as aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 253, p. 119251, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119251.

IDOINE, N. E.; RAYCRAFT, E. R.; HOBBS, S. F.; EVERETT, P.; EVANS, E. J.; MILLS, A. J.; SHAW, I. R.; WATKINS, I.; SHAW, R. A. *World Mineral Production 2019–23*. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey, 2025. ISBN 978-0-85272-802-4. Disponível em: https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/539285/1/WMP_2019-2023_COMPLETE.pdf. Acesso em: 10 jan. 2026.

INDEXBOX. Latin America and Caribbean's kaolin market overview 2024: kaolin exports to reach 898 kt in 2024; Brazil responsible for ~99% of total exports. 2025. Disponível em: <https://www.indexbox.io/blog/kaolin-latin-america-and-the-caribbean-market-overview-2024/>. Acesso em: 22 dez. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). *Economia mineral brasileira: informações e análises – 2024*. Brasília, 2025. Disponível em: <https://ibram.org.br/>. Acesso em: 04 jun. 2026.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. NP EN 772-11: métodos de ensaio para unidades de alvenaria – parte 11: determinação da absorção de água por capilaridade de unidades de alvenaria de betão, pedra artificial e pedra natural e da taxa inicial de absorção de água de unidades de alvenaria cerâmicas. Lisboa: IPQ, 2002.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Cement*. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/industry/cement>. Acesso em: 4 jun. 2026.

JIKE, N.; XU, C.; YANG, R.; QI, Y.; DAI, Y.; PENG, Y.; WANG, J.; ZHANG, M.; ZENG, Q. Pervious concrete with secondarily recycled low-quality brick-concrete demolition residue: engineering performances, multi-scale/phase structure and sustainability. *Journal of Cleaner Production*, v. 341, p. 130929, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130929.

JINDAL, R.; RANSINCHUNG, G. D. Behavioural study of incorporation of recycled concrete aggregates and mineral admixtures in pavement quality concrete. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, v. 55, n. 2, p. 351-372, 2022.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R. Clogging in permeable concrete: a review. *Journal of Environmental Management*, v. 193, p. 221-233, 2017. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.02.018.

- KIM, S.; SHIN, M.; JANG, J.; MOON, J.; LEE, S.; KIM, H. Effect of fly ash and metakaolin on pervious concrete properties. *Construction and Building Materials*, v. 223, p. 322-328, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.185.
- KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 127, p. 221–232, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.
- KRISHNAN, C. R.; SANTHANAM, M.; KUMAR, M.; RANGARAJAN, M. Iron oxide-modified pervious concrete filter for lead removal from wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, v. 28, p. 102681, 2022. DOI: 10.1016/j.eti.2022.102681.
- KUMAR, S. B.; KUMAR, P. G.; KUMAR, D. N. Assessing the impact of recycled concrete aggregates and metakaolin on the mechanical properties of pervious concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2025. DOI: 10.1080/19648189.2024.2416456.
- LAMB, G. S. Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- LATHA, M. Permeable concrete: a mind melting future of driveways and parking lots. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, v. 67, n. 2, p. 23-28, 2019. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V67I2P205
- LI, H.; YANG, J.; YU, X.; ZHANG, Y.; ZHANG, L. Permeability prediction of pervious concrete based on mix proportions and pore characteristics. *Construction and Building Materials*, v. 395, p. 132247, 2023a. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132247.
- LI, J.; ZHANG, Y.; LIU, G.; PENG, X. Preparation and performance evaluation of an innovative pervious concrete pavement. *Construction and Building Materials*, v. 138, p. 479-485, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.137.
- LI, R.; LEI, L.; PLANK, J. Impact of metakaolin content and fineness on the behavior of calcined clay blended cements admixed with HPEG PCE superplasticizer. *Cement and Concrete Composites*, v. 133, p. 104654, 2022. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104654.
- LI, S.; CUI, H.; WANG, H.; WANG, W.; SUI, Y.; DONG, L.; WANG, J. Preparation and performance investigation of epoxy resin-based permeable concrete containing ceramsite. *Polymers*, v. 15, n. 24, art. 4704, 2023b. DOI: 10.3390/polym15244704.
- LI, T.; XIA, J.; TANG, X. Exploring the efficacy of travertine pervious concrete pavement: a novel approach for urban runoff heavy metal mitigation. *Case Studies in Construction Materials*, v. 21, e03556, 2024. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03556.
- LIMA, P. E. A.; ANGÉLICA, R. S.; SCHELLER, T.; NEVES, R. F. Investigação da reatividade e da cinética de dissolução do metacaulim em ácido sulfúrico. *Cerâmica*, v. 59, n. 350, p. 317-325, 2013. DOI: 10.1590/S0366-69132013000200018.

LIMA, R. C. O. Diagnóstico dos impactos ambientais decorrentes do beneficiamento de caulim no município de Equador – RN. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v. 10, n. 2, p. 91-96, 2010. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/500/50016922010.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2026.

LIN, C.-H.; YU, J. Research on improving polymer pervious concrete mechanical strength by adding EVA to UP resin binder material. *Construction and Building Materials*, v. 359, p. 129416, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129416.

LIN, W.; PARK, D.-G.; RYU, S. W.; LEE, B.-T.; CHO, Y.-H. Development of permeability test method for porous concrete block pavement materials considering clogging. *Construction and Building Materials*, v. 118, p. 20-26, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.107.

LIU, H.; LUO, G.; WANG, L.; WANG, W.; LI, W.; GONG, Y. Laboratory evaluation of eco-friendly pervious concrete pavement material containing silica fume. *Applied Sciences*, v. 9, n. 1, p. 73, 2019. DOI: 10.3390/app9010073.

LIU, H.; WANG, Z.; TIAN, Z.; BU, J.; QIU, J. Effect and mechanism of metakaolin powder (MP) on rheological and mechanical properties of cementitious suspension. *Materials*, v. 15, n. 16, p. 5797, 2022. DOI: 10.3390/ma15165797.

LIU, R.; CHI, Y.; CHEN, S.; JIANG, Q.; MENG, X.; WU, K.; LI, S. Influence of pore structure characteristics on the mechanical and durability behavior of pervious concrete material based on image analysis. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 14, p. 29, 2020. DOI: 10.1186/s40069-020-00404-1.

LIU, W.; ZHANG, H.; CHEN, Z.; TAO, J.; ZHANG, X.; ZHAO, B. Performance of pervious concrete influenced by typical properties of recycled concrete aggregate and suggestions for practical use. *Road Materials and Pavement Design*, v. 25, n. 5, p. 1090-1111, 2024. DOI: 10.1080/14680629.2023.2238082.

LÔBO, D. P.; SILVA, T. R. da. Análise do concreto com substituição parcial do agregado miúdo natural pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar. 2021. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, 2021.

LONGHI, M. A.; RODRÍGUEZ, E. D.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; KIRCHHEIM, A. P. Valorisation of a kaolin mining waste for the production of geopolymers. *Journal of Cleaner Production*, v. 115, p. 265-272, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.011.

LORI, A. R.; HASSANI, A.; SEDGHI, R. Investigation of the mechanical and hydraulic characteristics of pervious concrete containing copper slag as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 197, p. 130-142, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.230.

MALHEIRO, R.L.M.C. Durabilidade do betão à ação combinada da carbonatação e dos iões cloreto considerando a presença de cinzas volantes. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Guimarães, 2018. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1822/58335>. Acesso em: 04 jun. 2026.

MAMUN, A. A.; SHAMS, S.; NURUZZAMAN, M. Review on uncertainty of the first-flush phenomenon in diffuse pollution control. *Applied Water Science*, v. 10, art. 127, 2020. DOI: 10.1007/s13201-019-1127-1.

MARTINS FILHO, S. T.; BOSQUESI, E. M.; FABRO, J. R.; PIERALISI, R. Characterization of pervious concrete focusing on non-destructive testing. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 13, n. 3, p. 483-500, 2020. DOI: 10.1590/S1983-41952020000300003.

MASTOURI, R.; POURFALLAH KOUSHALI, H.; KHALEDIAN, M. R. First flush analysis of stormwater runoff in a humid climate. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, v. 31, n. 1, p. 82-91, 2023. DOI: 10.3846/jeelm.2023.18064.

MEDEIROS, J. L. G.; MORAIS, C. R. S. Aplicação de técnicas termoanalíticas (TGA/DTA) para avaliação do comportamento térmico de amostras de argilas para obtenção de pozolanas. *Principia*, n. 50, p. 54-63, 2020. DOI: 10.18265/1517-0306a2020v1n50p54-63.

MEDVEDEV, V.; PUSTOVGAR, A. A review of concrete carbonation and approaches to its research under irradiation. *Buildings*, v. 13, n. 8, p. 1998, 2023. DOI: 10.3390/buildings13081998.

MEHRABI, P.; SHARIATI, M.; KABIRIFAR, K.; JARRAH, M.; RASEKH, H.; TRUNG, N. T.; SHARIATI, A.; JAHANDARI, S. Effect of pumice powder and nanoclay on the strength and permeability of fiber-reinforced pervious concrete containing recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 287, p. 122652, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122652.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: microstructure, properties and materials*. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0-07-179787-0.

MERINO-LECHUGA, A. M.; GONZÁLEZ-CARO, Á.; FERNÁNDEZ-LEDESMA, E.; JIMÉNEZ, J. R.; FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, J. M.; SUESCUM-MORALES, D. Accelerated carbonation of vibro-compacted porous concrete for eco-friendly precast elements. *Materials*, v. 16, n. 8, art. 2995, 2023. DOI: 10.3390/ma16082995.

MERINO-LECHUGA, A. M.; LAMAA, G.; SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; JIMÉNEZ, J. R.; FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, J. M.; GONZÁLEZ-CARO, Á. Accelerated carbonation of pervious concrete paving blocks compacted by alkali vibration. *Construction and Building Materials*, v. 449, p. 138458, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138458.

MNG'ONG'O, M. E.; MATIMBWA, H. Lead, zinc, aluminum and copper in rainwater influenced by roof type and age: implications for domestic water consumption. *Next Research*, v. 2, p. 100118, 2025. DOI: 10.1016/j.nexres.2024.100118.

MOHAMMED, B. S.; NURUDDIN, M. F.; DAYALAN, Y. A. P. Properties of high permeable concrete utilizing pozzolanic materials. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 11, n. 3, p. 1457-1465, 2016.

MONTEIRO, A. C. N. *Concreto poroso: dosagem e desempenho*. 2010. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás,

Goiânia, 2010. Disponível em:

https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/CONCRETO_POROSO_DOSAGEM_E_DESEMPENHO.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 07 jun. 2026.

MONTEIRO, H. B. S.; NÓBREGA, A. F.; SILVA, J. C.; BELO, F. A.; MONTEIRO, K. B. S. Smart lime–metakaolin mortars with piezoresistive properties for monitoring historical buildings. *Journal of Building Engineering*, v. 117, p. 114752, 2025. DOI: 10.1016/j.jobbe.2025.114752.

MOUSAVI, S.-F.; KARAMI, H.; FARZIN, S.; TEYMOURI, E. Effects of adding mineral adsorbents to porous concrete for enhancing the quality performance of urban runoff systems. *World Journal of Engineering*, v. 15, n. 4, p. 489-497, 2018. DOI: 10.1108/WJE-10-2017-0314.

MUTHU, M. Impact of hydraulic loading on the removal of separate and mixed heavy metals in porous concrete. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 32, p. 22686-22697, 2025. DOI: 10.1007/s11356-025-36908-0.

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*, v. 69, p. 106275, 2023. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.106275.

NG, C. Y.; NARONG, A. R.; ZAMAN, A. B. K.; MUSTAFFA, Z.; MOHAMMED, B. S.; EAN, L. W. Properties of modified high permeable concrete with crumb rubber. *The Open Civil Engineering Journal*, v. 13, p. 82-91, 2019. DOI: 10.2174/1874149501913010082.

NGUYEN, T. T.; NGO, H. H.; GUO, W.; WANG, X. C.; REN, N.; LI, G. Implementation of a specific urban water management strategy: sponge city. *Science of the Total Environment*, v. 652, p. 147-162, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.168.

OLIVEIRA, M. P. Estudo de um caulim calcinado do Estado da Paraíba como material de substituição parcial do cimento Portland. 2004. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/6816>. Acesso em: 25 maio 2026.

PATRÍCIO, A. C. L. Adsorption potential of kaolin processing waste. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/1477>. Acesso em: 07 jun. 2026.

PERERA, T.; MCGREE, J.; EGODAWATTA, P.; JINADASA, K. B. S. N.; GOONETILLEKE, A. New conceptualisation of first flush phenomena in urban catchments. *Journal of Environmental Management*, v. 281, p. 111820, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111820.

PILS, S. E.; LIMA, P. R. C.; CAVALCANTI, C. C.; MANUEL, A. C.; PAIVA, L. F.; GODINHO, L. G.; MONTEIRO, P. J. M. Pervious concrete: study of dosage and polypropylene fibers addition. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 12, n. 1, p. 101-121, 2019. DOI: 10.1590/S1983-41952019000100006.

POPICK, H.; BRINKMANN, M.; MCPHEDRAN, K. Assessment of stormwater discharge contamination and toxicity for a cold-climate urban landscape. *Environmental Sciences Europe*, v. 34, n. 1, art. 619, 2022. DOI: 10.1186/s12302-022-00619-x.

PUNYASURB, J.; WATTANASIRIWECH, S.; WATTANASIRIWECH, D. Permeable blocks with waste glass as coarse aggregate. *Chiang Mai Journal of Science*, v. 50, n. 6, p. 1-13, 2023. DOI: 10.12982/CMJS.2023.062.

RAHUL, R.; RAVI KUMAR, M. S. Experimental study of the effect of fine aggregate in pervious concrete. *Materials Technology*, v. 59, n. 1, p. 31-37, 2025. DOI: 10.17222/mit.2024.1295.

RAMA, M.; SHANTHI, V. M. Study on strength, permeability, and microstructure of pervious concrete blended with metakaolin. *Jordan Journal of Civil Engineering*, v. 17, n. 1, p. 10-22, 2023. DOI: 10.14525/JJCE.v17i1.02.

RANIERI, V.; COROPULIS, S.; BERLOCO, N.; FEDELE, V.; INTINI, P.; LARICCHIA, C.; COLONNA, P. The effect of different road pavement typologies on urban heat island: a case study. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, v. 7, n. 6, p. 803-822, 2022. DOI: 10.1080/23789689.2022.2067951.

REYAD, M.; ELTAIR, A. M.; EL-NEMR, A.; JATO-ESPINO, D. Mechanical and permeability behavior of porous concrete using different aggregate sizes and polypropylene fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 36, n. 6, art. 04024132, 2024. DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-16429.

RIEKERT, S. M.; WINSTON, R. J.; BURRIS, L. E. Pervious concrete for treatment of acid mine drainage: neutralization of pH and removal of dissolved iron, aluminum, manganese, and copper. *Journal of Environmental Management*, v. 375, p. 124188, 2025. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124188.

RIZZATTI, M.; BATISTA, N. Mapping flooded areas in the municipalities of Agudo, Dona Francisca, Paraíso do Sul and Restinga Sêca, Rio Grande do Sul, Brazil. *Estrabão*, v. 5, n. 1, p. 287-297, 2024. DOI: 10.53455/re.v5i1.259.

RODRIGUES, A. M.; COSTA, F. P.; BELTRÃO, S. L. D.; FERNANDES, J. V.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A. Development of eco-friendly mortars produced with kaolin processing waste: durability behavior viewpoint. *Sustainability*, v. 13, n. 20, p. 11395, 2021. DOI: 10.3390/su132011395.

SANDOVAL, G. F. B.; LEITE, M. P.; SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; SILVA FILHO, L. C. P. Pervious concrete made with electric furnace slag (EAF): mechanical and hydraulic properties. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 12, n. 3, p. 1-19, 2019. DOI: 10.1590/S1983-41952019000300009.

SATHIPARAN, N.; JEYANANTHAN, P.; SUBRAMANIAM, D. N. Influence of metakaolin on pervious concrete strength: a machine learning approach with Shapley additive explanations. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, v. 8, p. 1-20, 2025. DOI: 10.1007/s41939-024-00455-x.

SCHACKOW, A.; EFFTING, C.; BARROS, V. G.; GOMES, I. R.; COSTA NETO, V. S.; DELANDRÉA, M. S. Permeable concrete plates with wastes from the paper industry: reduction of surface flow and possible applications. *Construction and Building Materials*, v. 250, p. 118896, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118896.

SCHWETZ, C.; LONGO, D.; SCHIAVON, A.; MORAES, G. Concreto permeável: otimização do traço para pavimentação de fluxo leve. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DA PATOLOGIA DA CONSTRUÇÃO, 13., 2015, Lisboa. Lisboa, 2015.

SEIFEDDINE, K.; AMZIANE, S.; TOUSSAINT, E. State of the art on the hydraulic properties of pervious concrete. *Road Materials and Pavement Design*, v. 24, n. 11, p. 2561-2596, 2023. DOI: 10.1080/14680629.2022.2164332.

SHA, F.; ZHANG, S.-M.; SUN, X.-C.; FAN, G.-X.; DIAO, Y.; DUAN, X.-F.; QIAO, A.-L.; WANG, H. Mechanical performance and pore characteristics of pervious concrete. *Case Studies in Construction Materials*, v. 21, p. e03674, 2024. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03674.

SHAN, J.; ZHANG, Y.; WU, Q. *et al.* Pore characteristics of pervious concrete and their influence on permeability attributes. *Construction and Building Materials*, v. 327, p. 126874, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126874.

SHEN, P.; ZHENG, H.; LIU, S.; LU, J.-X.; POON, C. S. Development of high-strength permeable concrete incorporating high volumes of waste glass. *Cement and Concrete Composites*, v. 114, p. 103790, 2020. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103790.

SHEN, P.; ZHENG, H.; LU, J.; POON, C. S. Utilization of incineration bottom ash (IBA) aggregates in high-strength permeable concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 174, p. 105736, 2021. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105736.

SHERFENAZ, A. Sustainable use of induction furnace slag as coarse aggregate in pervious concrete: strength and hydrological properties. *Case Studies in Construction Materials*, v. 22, p. e04653, 2025. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04653.

SHERWANI, A. F. H.; FARAJ, R.; YOUNIS, K. H.; DARAEI, A. Mechanical strength, abrasion resistance and permeability of pervious concrete with artificial fly ash aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, v. 14, p. e00502, 2021. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00502.

SILVA, J. V. A.; OLIVEIRA, L. R.; SILVA, N. C. F.; MOURA, C. M. S.; VITAL, S. R. O. Mapeamento da evolução histórica do uso e ocupação do solo no município de João Pessoa, Paraíba, de 1985 a 2022. *Geopauta*, v. 8, p. e15608, 2024. DOI: 10.22481/rg.v8.e2024.e15608.pt.

SILVA, M. C. L.; LEITE, M. M. B.; RAIMUNDO, R. A.; HENRIQUES, G. F.; VALCACER, S. M.; MASHHADIKARIMI, M.; MORALES, M. A.; GOMES, U. U. Consolidation and mechanical properties of WC-Al₂O₃ composite prepared via high energy ball milling and spark plasma sintering. *Ceramics International*, v. 48, n. 13, p. 19026–19035, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.03.191>.

SILVA, L. S.; COSTA, M. C. B. da; NOGUEIRA, M. H. P.; LIMA, G. K. M.; BATISTA, N. J. da S. Estudo da viabilidade técnica do uso de concreto permeável em pavimentos urbanos

de baixo tráfego utilizando agregado graúdo regional. RCT – Revista de Ciência e Tecnologia, Boa Vista, v. 5, n. 8, p. 34–47, 2019. DOI: <https://doi.org/10.18227/rct.v5i8.5217>.

SILVEIRA, T. A.; FUSINATO, M. D.; CALEGARO, G. L.; GOMES, C. C.; DELÚCIOS, R. Á. Argamassas de revestimento com caulim residual brasileiro de fração fina. Resíduos, v. 4, n. 1, art. 3, 2026. DOI: 10.3390/waste4010003.

SINGH, D.; PAL SINGH, S. Properties of pervious concrete with recycled concrete aggregates and cement replacements. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Construction Materials, v. 175, n. 4, p. 173-184, 2022a. DOI: 10.1680/jcoma.20.00086.

SINGH, K.; GHOSH, G. Stress behavior of concrete pavement. Materials Today: Proceedings, v. 55, n. 2, p. 246-249, 2021a. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.06.424.

SINGH, S. B.; MURUGAN, M. Effect of metakaolin on the properties of pervious concrete. Construction and Building Materials, v. 346, p. 128476, 2022b. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128476.

SONG, C. Application of nature-based measures in China's sponge city initiative: current trends and perspectives. Nature-Based Solutions, v. 2, p. 100010, 2022. DOI: 10.1016/j.nbsj.2022.100010.

SPACEMONEY. Valência: enchentes na Espanha têm 95 mortos e desaparecidos. 2025. Disponível em: <<https://www.spacemoney.com.br/economia/exterior/valencia-enchentes-na-espanha-tem-95-mortos-e-desaparecidos/>>. Acesso em: 23 maio 2026.

SRIRAVINDRARAJAH, R.; WANG, N. D. H.; ERVIN, L. J. W. Mix design for pervious recycled aggregate concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 6, n. 4, p. 239-246, 2012. DOI: 10.1007/s40069-012-0024-x.

STUTZMAN, P. E.; FENG, P.; BULLARD, J. W. Phase analysis of Portland cement by combined quantitative X-ray powder diffraction and scanning electron microscopy. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, v. 121, p. 47–107, 2016. DOI: 10.6028/jres.121.004.

TAMIMI, A.; TABSH, S. W.; EL EMAM, M. Pervious concrete made with recycled coarse aggregate and reinforced with date palm leaves fibers. Materials, v. 16, n. 23, p. 7496, 2023. DOI: 10.3390/ma16237496.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. Study on the influence of recycled concrete aggregates in pervious concrete. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 9, n. 1, p. 75-89, 2016. DOI: 10.1590/S1983-41952016000100005.

UNITED NATIONS. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. New York: United Nations, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 1 mar. 2026.

VIDAL, A. dos S. Caracterização de concreto permeável produzido com resíduos de construção e demolição para utilização em pavimentação permeável em ambiente urbano.

2014. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

VIEIRA, A. A. P. Microdureza aplicada ao estudo do dano em revestimentos compósitos para superfícies metálicas. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, João Pessoa, 2010.

VIEIRA, G. L.; SCHIAVON, J. Z.; BORGES, P. M.; SILVA, S. R. da; ANDRADE, J. J. O. de. Influence of recycled aggregate replacement and fly ash content on the performance of pervious concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*, v. 271, p. 122665, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122665>.

WANG, J.; MENG, Q.; TAN, K.; ZHANG, L.; ZHANG, Y. Experimental investigation on the influence of evaporative cooling of permeable pavements on outdoor thermal environment. *Building and Environment*, v. 140, p. 184–193, 2018. DOI: [10.1016/j.buildenv.2018.05.033](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.033).

WEISE, K.; ENDELL, L. M.; UKRAINCZYK, N.; KOENDERS, E. Pozzolanic metakaolin reactivity: time-dependent influence of calcium hydroxide, alkali hydroxides, and sulfates. *Construction and Building Materials*, v. 431, p. 136534, 2024. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2024.136534](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136534).

WEISE, K.; UKRAINCZYK, N.; KOENDERS, E. Pozzolanic reactions of metakaolin with calcium hydroxide: review on hydrate phase formations and effect of alkali hydroxides, carbonates and sulfates. *Materials & Design*, v. 231, p. 112062, 2023. DOI: [10.1016/j.matdes.2023.112062](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112062).

WONG, T. H. F.; BROWN, R. R. The water sensitive city: principles for practice. *Water Science and Technology*, v. 60, n. 3, p. 673–682, 2009.

XIA, D.; XIA, P.; HU, J.; LI, X.; ZHAN, Z. Optimization of mechanical properties of pervious recycled concrete using polypropylene fiber and waterborne epoxy resin. *Structures*, v. 63, p. 106372, 2024. DOI: [10.1016/j.istruc.2024.106372](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106372).

XIMENES, J. M. C. B. Conceção de um betão drenante para pavimentos rígidos. 2024. Tese (Doutoramento em Engenharia Civil) — Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2024.

YANG, Q.; GAO, Z.; BEECHAM, S. A sustainable approach for cleaning porous and permeable pavements. *Sustainability*, v. 14, art. 14583, 2022. DOI: [10.3390/su142114583](https://doi.org/10.3390/su142114583).

YANG, Z.; XU, Y.; CAI, X.; WU, J.; WANG, J. Studying properties of pervious concrete containing recycled aggregate loaded with TiO₂. *Construction and Building Materials*, v. 406, p. 133398, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133398>.

YUAN, Y.; ZHENG, Y.; ZHAI, J.; HUANG, X.; YAO, M.; SHI, J. How does the sponge city pilot policy affect urban water system climate resilience? Quasi-experimental evidence from China. *Urban Climate*, v. 64, p. 102643, 2025. DOI: [10.1016/j.uclim.2025.102643](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102643).

ZHANG, G.; WANG, S.; WANG, B.; ZHAO, Y.; KANG, M.; WANG, P. Properties of pervious concrete with steel slag as aggregate and different mineral additions as binders. *Construction and Building Materials*, v. 257, p. 119543, 2020a. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119543.

ZHANG, Y.; LI, H.; ABDELHADY, A.; YANG, J. Comparative laboratory measurement of pervious concrete permeability using constant-head and falling-head permeameter methods. *Construction and Building Materials*, v. 263, p. 120614, 2020b. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120614.

ZHANG, Z.; WANG, Y.; LI, H.; CHEN, Y. Pore characteristics of pervious concrete and their influence on permeability attributes. *Construction and Building Materials*, v. 327, p. 126874, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126874.

ZHONG, R.; LENG, Z.; POON, C. S. Evaluation of the performance of pervious concrete inspired by CO₂-curing technology. *Applied Sciences*, v. 14, n. 10, p. 4202, 2024. DOI: 10.3390/app14104202.

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*, v. 183, p. 544-553, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.131.

ZHONG, R.; WILLE, K. Linking pore system characteristics to the compressive behavior of pervious concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 70, p. 130–138, 2016. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.03.016.

ZHU, H.; WEN, C.; WANG, Z.; LI, L. Study on the permeability of recycled aggregate pervious concrete with fibers. *Materials*, v. 13, n. 2, p. 321, 2020. DOI: 10.3390/ma13020321.

APÊNDICE A - RESULTADOS DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A.1 Análise estatística dos resultados de espalhamento das pastas estudadas

Quadro A.1 – Teste de *Shapiro-Wilk* para análise da normalidade dos resultados de espalhamento

Grupo	P	Considerações
PREF	NaN	Não testável (N=2), para que o teste possa ser realizado N>3
SMK10	0,060	P>0,05
SMK20	0,989	P>0,05
AMK10	0,209	P>0,05
AMK20	0,004	P<0,05 (Rejeita-se a hipótese de normalidade)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.2 – Teste de *Kruskal-Wallis* para análise das médias dos espalhamentos

Espalhamento	X ²	gl	p
	10,8	4	0,029

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.3 – Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dwass-Steel-Critchlow-Fligner* aplicado aos resultados de espalhamento

PREF vs SMK10	-2,74	0,298	Não
PREF vs SMK20	-2,74	0,298	Não
PREF vs AMK10	-2,76	0,289	Não
PREF vs AMK20	-2,74	0,298	Não
SMK10 vs SMK20	-2,51	0,388	Não
SMK10 vs AMK10	1,33	0,880	Não
SMK10 vs AMK20	-1,03	0,949	Não
SMK20 vs AMK10	2,82	0,271	Não
SMK20 vs AMK20	2,67	0,325	Não
AMK10 vs AMK20	-1,63	0,779	Não

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.4 – Matriz de correlações da composição das pastas e espalhamento

		Água	Cimento	Água/finos	Metacaulim	Espalhamento
Água	Roh de Spearman	-				
	gl	-				

	p-valor	-				
Cimento	Roh de Spearman	-0,330	-			
	gl	20	-			
	p-valor	0,134	-			
Água/finos	Roh de Spearman	0,537**	-0,935***	-		
	gl	20	20	-		
	p-valor	0,010	<0,001	-		
Metacaulim	Roh de Spearman	0,326	-0,894***	0,959***	-	
	gl	20	20	20	-	
	p-valor	0,139	<0,001	<0,001	-	
Espalhamento	Roh de Spearman	0,070	0,487*	-0,508*	-0,614**	-
	gl	20	20	20	20	-
	p-valor	0,758	0,021	0,016	0,002	-

Nota. * p<0,05; ** p<0,01; ***p<0,001;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.5 – Matriz de correlação parcial das pastas e espalhamento

		Espalhamento	Cimento	Água	Água/cimento
Espalhamento	Roh de Spearman	-			
	p-valor	-			
Cimento	Roh de Spearman	-0,461*	-		
	p-valor	0,035	-		
Água	Roh de Spearman	0,368	-0,519*	-	
	p-valor	0,101	0,016	-	
Água/cimento	Roh de Spearman	0,497*	-0,897***	0,842***	-
	p-valor	0,022	<0,001	<0,001	-

Nota: Controlado para metacaulim;

Nota: * p<0,05; ** p<0,01; ***p<0,001;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.6 – Regressão linear múltipla: qualidade do ajuste do modelo

Métrica	Valor	Interpretação
R	0,823	Correlação muito forte entre preditores e resposta
R ²	0,678	O modelo explica 67,8% da variabilidade do espalhamento
R ² ajustado	0,644	Corrigido para número de variáveis, ainda muito alto
RMSE	10,6	Erro médio da predição ($\pm 10,6$ mm)
F (p)	20,0 (p < 0,001)	O modelo é estatisticamente muito significativo

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.7 – Coeficientes da regressão

Variável	Coeficiente	Erro-padrão	t	p
Intercepto	232,59	9,18	25,33	<0,001
Caulim calcinado	-0,123	0,0208	-5,92	<0,001
Água/cimento	+56,90	22,81	+2,49	0,022

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.8 – Verificação dos pressupostos

Verificação	Resultado	Interpretação
Autocorrelação (Durbin-Watson)	1,93 (p = 0,516)	Sem autocorrelação dos resíduos
Normalidade dos resíduos (S-W)	p = 0,061	Quase normal (aceitável)
Colinearidade (VIF)	1,91 (ambas)	Sem multicolinearidade

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A.2 Análise estatística das resistências à flexão das pastas estudadas

Quadro A.9 – Estatística descritiva e teste de normalidade (*Shapiro-Wilk*) da resistência à flexão

Idade (dias)	Mistura	Média	Desvio-padrão	W	p
7	PREF	2,52	0,33	0,973	0,861
7	SMK10	2,17	0,69	0,860	0,259
7	SMK20	2,56	0,28	0,979	0,899
7	AMK10	1,93	0,42	0,953	0,735
7	AMK20	2,67	0,78	0,955	0,750
28	PREF	3,00	0,40	0,888	0,373
28	SMK10	3,85	0,57	0,907	0,466
28	SMK20	5,49	0,25	0,883	0,351
28	AMK10	3,47	0,39	0,974	0,865
28	AMK20	4,99	0,62	0,901	0,435
63	PREF	2,77	0,16	0,875	0,319
63	SMK10	4,21	0,26	0,971	0,847
63	SMK20	6,23	0,47	0,934	0,618

63	AMK10	4,34	0,60	0,997	0,991
63	AMK20	6,12	0,65	0,955	0,746

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.10 – ANOVA de medições repetidas da resistência à flexão

Efeito	gl	F	p
Tempo	2	109,08	<0,001
Tempo x Mistura	8	7,16	<0,001
Mistura	4	55,90	<0,001

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.11 – Testes post hoc (Tukey) entre idades da resistência à flexão

Comparação	Diferença média	p
7 x 28 dias	-1,79	<0,001
7 x 63 dias	-2,36	<0,001
28 x 63 dias	-0,58	0,012

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.12 – Modelo de regressão linear múltipla para resistência à flexão aos 63 dias

Preditor	Coefficiente	Erro-padrão	t	p
Intercepto	12,84	4,79	2,68	0,016
Metacaulim	0,00068	0,00145	0,47	0,643
Cimento	-0,00290	0,00083	-3,50	0,003
Água	-0,00192	0,00335	-0,57	0,575

Nota. Ajuste do modelo: $R^2 = 0,63$; R^2 ajustado = 0,56; $p < 0,001$;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A.3 Análise estatística das resistências à compressão das pastas estudadas

Quadro A.13 – Estatística descritiva e teste de normalidade (Shapiro-Wilk) da resistência à compressão. Valores conforme disponibilidade amostral

Idade (dias)	Mistura	Média	Desvio-padrão	W	p
7	PREF	45,9	7,57	0,932	0,534
7	SMK10	39,0	12,46	0,879	0,222
7	SMK20	37,5	10,27	0,977	0,945
7	AMK10	62,9	8,25	0,977	0,947
7	AMK20	47,1	12,07	0,906	0,325
28	PREF	43,4	11,49	0,967	0,872
63	SMK10	57,2	8,83	0,962	0,839
63	SMK20	56,2	8,28	0,915	0,389
63	AMK10	43,4	16,37	0,958	0,790
63	AMK20	52,4	11,18	0,919	0,425

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.14 – ANOVA de medições repetidas da resistência à compressão

Efeito	gl	F	p
Tempo	2	2,24	0,114
Tempo x Mistura	10	5,58	<0,001
Mistura	5	0,66	0,655

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.15 – Modelo de regressão linear múltipla para resistência à flexão aos 63 dias

Preditor	Coefficiente	Erro-padrão	t	p
Intercepto	137,08	41,08	3,34	0,002
Metacaulim	-0,0107	0,00725	-1,47	0,150
Cimento	0,0217	0,01283	1,69	0,100
Água	-0,0657	0,02872	-2,29	0,028

Nota. Ajuste do modelo: $R^2 = 0,234$; $p = 0,021$;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A.4 Análise estatística do índice de vazios dos concretos permeáveis referências

Quadro A.16 – Teste não paramétrico de *Kruskal–Wallis* para o índice de vazios dos concretos permeáveis referências aos 28 e 63 dias

	χ^2	gl	p	ϵ^2
Índice de vazios aos 28 dias	1,25	2	0,534	0,114
Índice de vazios aos 63 dias	7,55	2	0,023	0,686

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.17 – Comparações múltiplas pelo método *Dwass–Steel–Critchlow–Fligner* para o índice de vazios dos concretos permeáveis referências aos 28 dias

	W	p
REF - REF MK10	0,000	1,000
REF - REF MK20	1,030	0,746
REF MK10 – REF MK20	1,640	0,476

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.18 – Comparações múltiplas pelo método *Dwass–Steel–Critchlow–Fligner* para o índice de vazios dos concretos permeáveis referências aos 63 dias

	W	p
REF - REF MK10	1,09	0,719
REF - REF MK20	3,24	0,057
REF MK10 – REF MK20	3,37	0,045

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A.5 Análise estatística das resistências mecânicas dos concretos permeáveis referências

Quadro A.19 – Teste não paramétrico de *Kruskal–Wallis* para as resistências à compressão e à flexão dos concretos permeáveis referências aos 28 e 63 dias

	χ^2	gl	p	ϵ^2
Compressão aos 28 dias	9,27	2	0,010	0,843
Compressão aos 63 dias	7,42	2	0,024	0,675
Flexão aos 28 dias	9,30	2	0,010	0,846
Flexão aos 63 dias	6,62	2	0,037	0,601

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.20 – Matriz de correlação dos resultados mecânicos das misturas de concretos permeáveis referências

		Compressão aos 28 dias	Compressão aos 63 dias	Flexão aos 28 dias	Flexão aos 63 dias	Abrasão aos 28 dias	Abrasão aos 63 dias	Índice de vazios aos 28 dias	Índice de vazios aos 63 dias
Compressão aos 28 dias	Roh de Spearman	-							
	gl	-							
	p-valor	-							
Compressão aos 63 dias	Roh de Spearman	0,776**	-						
	gl	10	-						
	p-valor	0,005	-						
Flexão aos 28 dias	Roh de Spearman	0,795**	0,834***	-					
	gl	10	10	-					
	p-valor	0,002	<0,001	-					
Flexão aos 63 dias	Roh de Spearman	0,692*	0,734**	0,869***	-				
	gl	10	10	10	-				
	p-valor	0,016	0,009	<0,001	--				
Abrasão aos 28 dias	Roh de Spearman	-0,692*	-0,503	-0,434	-0,573	-			
	gl	10	10	10	10	-			
	p-valor	0,016	0,099	0,158	0,055	-			
Abrasão aos 63 dias	Roh de Spearman	0,025	0,109	0,225	0,354	0,252	-		
	gl	10	10	10	10	10	-		
	p-valor	0,940	0,737	0,483	0,259	0,429	-		
Índice de vazios aos 28 dias	Roh de Spearman	-0,246	-0,151	-0,199	-0,183	0,169	0,368	-	
	gl	10	10	10	10	10	10	-	
	p-valor	0,441	0,639	0,535	0,570	0,600	0,239	-	
Índice de vazios aos 63 dias	Roh de Spearman	-0,619*	-0,637*	-0,856***	-0,781**	0,486	0,087	0,0416	-
	gl	10	10	10	10	10	10	10	-
	p-valor	0,032	0,026	<0,001	0,003	0,109	0,789	0,179	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A.6 Análise estatística do índice de vazios dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG

Quadro A.21 – Teste não paramétrico de *Kruskal-Wallis* para o índice de vazios dos concretos permeáveis referências aos 28 e 63 dias

	χ^2	gl	p	ϵ^2
Índice de vazios aos 28 dias	15,6	10	0,111	0,363
Índice de vazios aos 63 dias	23,1	10	0,010	0,538

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A.7 Análise estatística do coeficiente de permeabilidade à carga constante e à carga variável dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG

Quadro A.22 – ANOVA de medições repetidas aplicada ao coeficiente de permeabilidade a carga constante com efeito intra-sejeitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise aos 28 dias)

	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Fator de medição repetida 1	6,42	1	6,4152	96,2	<0,001
Fator de medição repetida 1* identificação	26,51	10	2,6510	39,8	<0,001
Residual	2,20	33	0,0667		

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.23 – ANOVA de medições repetidas aplicada ao coeficiente de permeabilidade à carga constante com efeito inter-sejeitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise aos 28 dias)

	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Identificação	489,28	10	48,928	347	<0,001
Residual	4,66	33	0,141		

Nota: Soma de Quadrados de Tipo 3;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.24 – Coeficiente de permeabilidade à carga constante aos 28 dias e comparação múltipla de médias dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (*Tukey* $p < 0,05$)

Mistura	Kdry (mm/s)	Ksat (mm/s)
REF	5,89 ± 0,15c	4,02 ± 0,05cd
REFMK10	8,47 ± 0,13b	8,13 ± 0,25b
REFMK20	7,09 ± 0,45c	4,77 ± 0,31d
RCF10	3,90 ± 0,17e	5,34 ± 0,51c
RCF20	3,65 ± 0,18e	5,89 ± 0,15c
RCF30	6,04 ± 0,47c	5,92 ± 0,42c
RCF40	1,71 ± 0,12f	1,30 ± 0,05e
RCG10	6,45 ± 0,48c	2,75 ± 0,19d
RCG20	3,65 ± 0,18e	5,89 ± 0,15c
RCG30	12,18 ± 0,28a	9,26 ± 0,10a
RCG40	4,48 ± 0,10d	5,03 ± 0,49c

1 - Letras iguais indicam que não há diferença estatística significativa ($p > 0,05$);

2 - Letras diferentes indicam diferença significativa ($p < 0,05$);

3 - A atribuição foi feita considerando os resultados do *Post Hoc*;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.25 – ANOVA de medições repetidas aplicada ao coeficiente de permeabilidade a carga constante com efeito intra-sejeitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise aos 63 dias)

	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Fator de medição repetida 1	3,52	1	3,5200	64,4	<0,001
Fator de medição repetida 1* identificação	6,04	10	0,6042	11,1	<0,001
Residual	1,80	33	0,0546		

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.26 – ANOVA de medições repetidas aplicada ao coeficiente de permeabilidade à carga constante com efeito inter-sejeitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise aos 63 dias)

	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Identificação	520,08	10	52,0085	942	<0,001
Residual	1,82	33	0,0552		

Nota: Soma de Quadrados de Tipo 3;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.27 – Coeficiente de permeabilidade à carga constante aos 63 dias e comparação múltipla de médias dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (*Tukey* $p < 0,05$)

Mistura	Kdry (mm/s)	Ksat (mm/s)
REF	5,82 ± 0,10d	5,84 ± 0,14d
REFMK10	7,14 ± 0,22d	7,31 ± 0,35d
REFMK20	6,19 ± 0,12d	5,91 ± 0,40d
RCF10	3,72 ± 0,15c	2,69 ± 0,04c
RCF20	3,07 ± 0,28c	1,71 ± 0,05c
RCF30	5,01 ± 0,42e	5,08 ± 0,18e
RCF40	1,29 ± 0,01b	1,04 ± 0,06b
RCG10	3,37 ± 0,04c	3,25 ± 0,02c
RCG20	3,94 ± 0,23c	3,66 ± 0,14c
RCG30	11,04 ± 0,44a	9,80 ± 0,22a
RCG40	1,29 ± 0,01b	1,04 ± 0,06b

1 - Letras iguais indicam que não há diferença estatística significativa ($p > 0,05$);

2 - Letras diferentes indicam diferença significativa ($p < 0,05$);

3 - A atribuição foi feita considerando os resultados do *Post Hoc*;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.28 – ANOVA de medições repetidas aplicada ao coeficiente de permeabilidade a carga variável com efeito intra-sejeitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise aos 28 dias)

	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Fator de medição repetida 1	20,53	1	20,526	76,98	<0,001
Fator de medição repetida 1* identificação	21,69	10	2,169	8,13	<0,001
Residual	8,80	33	0,267		

Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.29 – ANOVA de medições repetidas aplicada ao coeficiente de permeabilidade à carga variável com efeito inter-sejeitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise aos 28 dias)

	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Identificação	398,4	10	39,836	87,4	<0,001
Residual	15	33	0,456		

Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.30 – Coeficiente de permeabilidade à carga variável aos 28 dias e comparação múltipla de médias dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (*Tukey* $p < 0,05$)

Mistura	Kdry (mm/s)	Ksat (mm/s)
REF	10,28 ± 0,96a	9,71 ± 0,63d
REFMK10	9,39 ± 0,91a	8,40 ± 0,55c
REFMK20	10,04 ± 0,54a	8,96 ± 0,59c
RCF10	10,38 ± 0,24b	8,46 ± 0,44b
RCF20	4,58 ± 0,24b	2,10 ± 0,10b
RCF30	5,42 ± 0,45b	3,94 ± 0,27b
RCF40	5,60 ± 0,69b	6,15 ± 0,59b
RCG10	7,77 ± 0,71c	7,76 ± 0,18a
RCG20	8,89 ± 0,34d	7,67 ± 0,59a
RCG30	10,32 ± 0,43d	8,76 ± 0,46a
RCG40	9,42 ± 0,85d	9,94 ± 0,87a

1 - Letras iguais indicam que não há diferença estatística significativa ($p > 0,05$);

2 - Letras diferentes indicam diferença significativa ($p < 0,05$);

3 - A atribuição foi feita considerando os resultados do *Post Hoc*;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.31 – ANOVA de medições repetidas aplicada ao coeficiente de permeabilidade a carga variável com efeito intra-sejeitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise aos 63 dias)

	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Fator de medição repetida 1	3,15	1	3,154	5,25	0,028
Fator de medição repetida 1* identificação	10,80	10	1,080	1,80	0,100
Residual	19,83	33	0,601		

Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3; Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.32 – ANOVA de medições repetidas aplicada ao coeficiente de permeabilidade à carga variável com efeito inter-sejeitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (análise aos 63 dias)

	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Identificação	145,4	10	14,535	22,6	<0,001
Residual	21,3	33	0,644		

Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.33 – Coeficiente de permeabilidade à carga variável aos 63 dias e comparação múltipla de médias dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG (*Tukey* $p < 0,05$)

Mistura	Kdry (mm/s)	Ksat (mm/s)
REF	7,82 ± 0,24d	7,92 ± 0,31d
REFMK10	8,44 ± 0,56d	7,02 ± 0,02d
REFMK20	7,69 ± 0,28d	8,39 ± 0,56d
RCF10	6,82 ± 0,17b	6,91 ± 0,23b
RCF20	5,01 ± 0,27a	4,91 ± 0,49a
RCF30	5,05 ± 0,39a	4,68 ± 0,17a
RCF40	6,21 ± 0,50ab	6,13 ± 0,52ab
RCG10	8,86 ± 0,42c	7,95 ± 0,23cd
RCG20	9,56 ± 0,17c	9,44 ± 0,23cd
RCG30	7,83 ± 0,78c	8,01 ± 0,41cd
RCG40	8,58 ± 0,53c	7,72 ± 0,47cd

1 - Letras iguais indicam que não há diferença estatística significativa ($p > 0,05$);

2 - Letras diferentes indicam diferença significativa ($p < 0,05$);

3 - A atribuição foi feita considerando os resultados do *Post Hoc*;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A.8 Análise estatística das resistências mecânicas dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG

Quadro A.34 – Verificação dos pressupostos para as resistências à compressão dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG aos 28 e 63 dias

	W	p
Compressão aos 28 dias	0,974	0,409
Compressão aos 63 dias	0,927	0,008

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.35 – Teste não paramétrico de *Kruskal-Wallis* para as resistências à compressão dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG aos 28 e 63 dias

	χ^2	gl	p	ϵ^2
Compressão aos 28 dias	40,4	10	>0,001	0,940
Compressão aos 63 dias	37,5	10	>0,001	0,871

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.36 – ANOVA de *Welch* para as resistências à flexão dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG aos 28 e 63 dias

	F	gl₁	gl₂	p
Flexão aos 28 dias	33,6	10	12,9	<0,001
Flexão aos 63 dias	26,3	10	13,2	<0,001

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.37 – Teste não paramétrico de *Kruskal–Wallis* para as resistências perda de massa por abrasão de concretos permeáveis contendo RCF e RCG aos 28 e 63 dias

	χ^2	gl	p	ϵ^2
Abrasão aos 28 dias	31,7	10	<0,001	0,738
Abrasão aos 63 dias	24,4	10	0,007	0,566

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.38 – Matriz de correlação dos resultados mecânicos das misturas de concretos permeáveis contendo RCF e RCG

		Compressão aos 28 dias	Compressão aos 63 dias	Flexão aos 28 dias	Flexão aos 63 dias	Abrasão aos 28 dias	Abrasão aos 63 dias	Índice de vazios aos 28 dias	Índice de vazios aos 63 dias
Compressão aos 28 dias	Roh de Spearman	-							
	gl	-							
	p-valor	-							
Compressão aos 63 dias	Roh de Spearman	0,807***	-						
	gl	42	-						
	p-valor	<0,001	-						
Flexão aos 28 dias	Roh de Spearman	0,757***	0,707***	-					
	gl	42	42	-					
	p-valor	<0,001	<0,001	-					
Flexão aos 63 dias	Roh de Spearman	0,658***	0,692***	0,787***	-				
	gl	42	42	42	-				
	p-valor	<0,001	<0,001	<0,001	-				
Abrasão aos 28 dias	Roh de Spearman	-0,765***	-0,768***	-0,564***	-0,546***	-			
	gl	42	42	42	42	-			
	p-valor	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-			
Abrasão aos 63 dias	Roh de Spearman	-0,545***	-0,654***	-0,321*	-0,307*	0,605***	-		
	gl	42	42	42	42	42	-		
	p-valor	<0,001	<0,001	0,033	0,043	<0,001	-		
Índice de vazios aos 28 dias	Roh de Spearman	-0,249	-0,221	-0,051	-0,068	0,378*	0,484***	-	
	gl	42	42	42	42	42	42	-	
	p-valor	0,104	0,150	0,743	0,663	0,011	<0,001	-	
Índice de vazios aos 63 dias	Roh de Spearman	-0,491***	-0,518***	-0,386**	-0,402**	0,586***	0,317*	0,399**	-
	gl	42	42	42	42	42	42	42	-
	p-valor	<0,001	<0,001	0,010	0,007	<0,001	0,036	0,007	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A.9 Análise estatística da análise adsorptiva dos íons de alumínio e ferro dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG

Quadro A.39 – ANOVA de medições repetidas aplicada a adsorção de íons de alumínio com efeito intra-sejeitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG

	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Fator de medição repetida 1	9258	5	1851,6	67,55	<0,001
Fator de medição repetida 1* RCF	505	5	101,1	3,69	0,010
Fator de medição repetida 1* RCG	476	5	95,2	3,47	0,014
Residual	822	30	27,4		

Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.40 – ANOVA de medições repetidas aplicada a adsorção de íons de alumínio com efeito com efeito inter-sejeitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG

	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
RCF	386	1	386	2,26	0,183
RCG	237	1	237	1,38	0,284
Residual	1025	6	171		

Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3.

Quadro A.41 – Matriz de correlação dos resultados de adsorção em alumínio das misturas de concretos permeáveis contendo RCF e RCG

		Compressão aos 28 dias	Compressão aos 63 dias	Flexão aos 28 dias	Flexão aos 63 dias	Abrasão aos 28 dias	Abrasão aos 63 dias	Índice de vazios aos 28 dias	Índice de vazios aos 63 dias
1 hora	R de Pearson	-							
	gl	-							
	p-valor	-							
6 horas	R de Pearson	0,746*	-						
	gl	7	-						
	p-valor	0,021	-						
12 horas	R de Pearson	0,485	0,876**	-					
	gl	7	7	-					
	p-valor	0,185	0,002	-					
24 horas	R de Pearson	0,083	0,401	0,710*	-				
	gl	7	7	7	-				
	p-valor	0,833	0,285	0,032	-				
48 horas	R de Pearson	0,274	0,600	0,542	0,238	-			
	gl	7	7	7	7	-			
	p-valor	0,476	0,088	0,131	0,538	-			
RCF	R de Pearson	-0,196	-0,503	-0,394	0,218	-0,404	-		
	gl	7	7	7	7	7	-		
	p-valor	0,613	0,167	0,294	0,573	0,281	-		
RCG	R de Pearson	0,304	0,049	-0,258	-0,701*	0,131	-0,588	-	
	gl	7	7	7	7	7	7	-	
	p-valor	0,427	0,900	0,502	0,035	0,736	0,096	-	

Nota. *p < 0,05, **p<0,01, ***p<0,001;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.42 – ANOVA de medições repetidas aplicada a adsorção de íons de ferro com efeito intra-sejeitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG

	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Fator de medição repetida 1	12053	5	2410,5	64,749	<0,001
Fator de medição repetida 1* RCF	178	5	35,6	0,956	0,460
Fator de medição repetida 1* RCG	110	5	22,1	0,593	0,705
Residual	1117	30	37,2		

Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.43 – ANOVA de medições repetidas aplicada a adsorção de íons de ferro com efeito com efeito inter-sejeitos dos concretos permeáveis contendo RCF e RCG

	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
RCF	69,2	1	69,2	1,076	0,340
RCG	27,5	1	27,5	0,428	0,537
Residual	385,7	6	64,3		

Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro A.44 – Matriz de correlação dos resultados de adsorção em ferro das misturas de concretos permeáveis contendo RCF e RCG

		Compressão aos 28 dias	Compressão aos 63 dias	Flexão aos 28 dias	Flexão aos 63 dias	Abrasão aos 28 dias	Abrasão aos 63 dias	Índice de vazios aos 28 dias	Índice de vazios aos 63 dias
1 hora	R de Pearson	-							
	gl	-							
	p-valor	-							
6 horas	R de Pearson	0,503	-						
	gl	7	-						
	p-valor	0,168	-						
12 horas	R de Pearson	0,237	0,058	-					
	gl	7	7	-					
	p-valor	0,539	0,882	-					
24 horas	R de Pearson	0,733*	0,197	0,365	-				
	gl	7	7	7	-				
	p-valor	0,025	0,612	0,334	-				
48 horas	R de Pearson	-0,391	-0,391	-0,430	-0,392	-			
	gl	7	7	7	7	-			
	p-valor	0,298	0,299	0,248	0,296	-			
RCF	R de Pearson	-0,035	0,043	-0,483	0,090	0,343	-		
	gl	7	7	7	7	7	-		
	p-valor	0,930	0,913	0,188	0,819	0,366	-		
RCG	R de Pearson	-0,328	-0,287	0,178	-0,386	0,277	-0,588	-	
	gl	7	7	7	7	7	7	-	
	p-valor	0,389	0,454	0,647	0,305	0,471	0,096	-	

Nota. *p < 0,05, **p<0,01, ***p<0,001;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).