

INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO AGREGADO GRAÚDO E DA RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO NO DESEMPENHO DO CONCRETO PERMEÁVEL

Diego Alexandre Vaz (Secretaria de Mobilidade Urbana, Maringá, PR) E-mail:

diegoborbavaz@gmail.com

Rafaella Salvador Paulino (Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR) E-mail:

rspaulino@uem.br

Resumo: O concreto permeável constitui uma alternativa para o manejo das águas pluviais urbanas, cujo desempenho depende do equilíbrio entre propriedades mecânicas e hidráulicas. Este estudo avaliou a influência da granulometria do agregado graúdo e da relação água/cimento (a/c) sobre o desempenho de concretos permeáveis. Foram produzidas seis composições na proporção 1:4 (cimento:agregado), em massa, combinando relações a/c de 0,30 e 0,35 com três composições granulométricas: 100% brita 0 (b0), 100% brita 1 (b1) e 50% de cada fração (bm). Aos 28 dias, foram avaliadas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas. Os concretos com b0 apresentaram maiores absorções de água e índices de vazios, enquanto b1 apresentou menores índices de vazios e maiores massas específicas aparentes secas. As resistências à compressão variaram de 10,87 a 17,79 MPa e as resistências à tração por compressão diametral, de 1,47 a 2,27 MPa, com as maiores médias obtidas para bm. Os coeficientes de permeabilidade variaram de 3,81 a 7,33 cm/s e os fluxos de 1839,45 a 3543,85 L/(min·m²), sendo os maiores valores observados para b1. O aumento da relação a/c esteve associado a maiores resistências mecânicas médias e à tendência de redução da capacidade de percolação, com variações entre as composições granulométricas. Os resultados demonstraram que o índice de vazios, isoladamente, não explica o comportamento hidráulico e que a composição granulométrica modifica o equilíbrio entre resistência mecânica e capacidade de percolação, evidenciando a necessidade de sua associação à relação a/c na dosagem de concretos permeáveis.

Palavras-chave: pavimento permeável; drenagem urbana, permeabilidade, granulometria.

INFLUENCE OF COARSE AGGREGATE PARTICLE SIZE DISTRIBUTION AND WATER-TO-CEMENT RATIO ON PERVIOUS CONCRETE PERFORMANCE

Abstract: Pervious concrete represents an alternative solution for urban stormwater management, with its performance depending on the balance between mechanical and hydraulic properties. This study evaluated the influence of coarse aggregate gradation and water-to-cement ratio (w/c) on the performance of pervious concrete. Six mixtures were produced using a 1:4 cement-to-aggregate ratio by mass, combining w/c ratios of 0.30 and 0.35 with three aggregate gradations: 100% smaller-sized coarse aggregate (b0), 100% larger-sized coarse aggregate (b1), and a 50:50 blend of both fractions (bm). At 28 days, the physical, mechanical, and hydraulic properties were evaluated. Concretes containing b0 exhibited higher water absorption and void content, whereas those containing b1 showed lower void content and higher dry apparent density. Compressive strength ranged from 10.87 to 17.79 MPa, while splitting tensile strength ranged from 1.47 to 2.27 MPa, with the highest mean values obtained for bm. Permeability coefficients ranged from 3.81 to 7.33 cm/s, and water flow rates ranged from 1839.45 to 3543.85 L/(min·m²), with the highest values observed for b1. Increasing the w/c ratio was associated with higher mean mechanical strengths and a tendency toward reduced water percolation capacity, with variations among aggregate gradations. The results demonstrated that void content alone does not explain the hydraulic behavior and that aggregate gradation modifies the balance between mechanical strength and water percolation capacity, highlighting the need to consider aggregate gradation together with the w/c ratio in pervious concrete mixture design.

Keywords: pavement; urban drainage; permeability; aggregate gradation.

1. Introdução

As mudanças climáticas, associadas à intensificação da urbanização e das atividades

antrópicas, têm contribuído para o agravamento de problemas ambientais em áreas urbanas, como ilhas de calor e inundações. Como estratégia de mitigação desses impactos, tem-se proposto o desenvolvimento de soluções baseadas em urbanização sustentável, entre as quais se destacam os pavimentos de concreto permeável (ADRESI *et al.*, 2023). Nas cidades, as superfícies pavimentadas podem representar entre 20% e 40% da área urbana, o que reduz significativamente a infiltração da água da chuva no solo e aumenta o escoamento superficial, favorecendo a ocorrência de alagamentos e inundações em vias públicas (WU; THOMPSON, 2013). Essa condição compromete a infraestrutura urbana e impacta diretamente a mobilidade, a segurança e a qualidade de vida da população.

Nesse contexto, os pavimentos permeáveis têm sido amplamente estudados como uma solução eficiente para o gerenciamento das águas pluviais (ZHANG; LENG, 2017), uma vez que possibilitam a infiltração da água para as camadas inferiores do solo ou sua condução a sistemas de armazenamento, tratamento e reutilização. Dessa forma, contribuem para a redução da sobrecarga dos sistemas convencionais de drenagem urbana (ADRESI *et al.*, 2022; DEBNATH; SARKAR, 2020), ao mesmo tempo em que se inserem no contexto de crescente demanda por soluções construtivas mais sustentáveis e resilientes às mudanças climáticas e à expansão das áreas impermeáveis (SANDOVAL *et al.*, 2022). Além disso, esses sistemas favorecem a redução do escoamento superficial, promovem a recarga do lençol freático e auxiliam na mitigação de problemas urbanos como alagamentos e erosão do solo (YU *et al.*, 2023).

O concreto permeável, ou concreto poroso, é o principal material utilizado nesses pavimentos, caracterizando-se por uma estrutura com elevada porosidade e poros interconectados, geralmente entre 15% e 30%, o que é fundamental para seu desempenho hidráulico (SANDOVAL *et al.*, 2022). Essa estrutura permite a passagem eficiente da água, mantendo, ao mesmo tempo, resistência mecânica adequada para aplicações em calçadas, estacionamentos, parques e vias de baixo volume de tráfego (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016).

Diferentemente do concreto convencional, no qual a trabalhabilidade e a resistência à compressão são os principais parâmetros de desempenho, o concreto permeável apresenta um comportamento mais complexo, pois deve equilibrar simultaneamente resistência mecânica e permeabilidade, ambas dependentes de sua estrutura porosa interconectada (ADRESI *et al.*, 2023). Esse equilíbrio impõe desafios no processo de dosagem, exigindo atenção à proporção de pasta de cimento, à granulometria dos agregados, à forma dos grãos e à relação água/cimento.

Nesse sentido, diversos estudos indicam que o tipo, o tamanho e a forma dos agregados exercem influência direta nas propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável, afetando sua resistência à compressão, resistência à flexão, durabilidade e coeficiente de permeabilidade (YU *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2022; SHTREPI *et al.*, 2021). Além disso, observa-se a existência de correlações entre parâmetros de forma dos agregados e o percentual de vazios, evidenciando seu impacto no desempenho global do material (SHTREPI *et al.*, 2021; ALTUKI *et al.*, 2022; ZHOU *et al.*, 2019; PIOTROWSKA *et al.*, 2014).

Pesquisas recentes também reforçam a relação entre propriedades mecânicas e hidráulicas em placas de concreto permeável, demonstrando que o coeficiente de vazão está diretamente associado à conectividade dos poros. Um maior coeficiente de vazão indica maior presença de vazios interconectados, o que eleva a permeabilidade, mas tende a reduzir a resistência à flexão (PIMENTEL *et al.*, 2024).

Apesar da reconhecida influência da granulometria e da relação água/cimento sobre

concretos permeáveis, seus efeitos são frequentemente analisados isoladamente. Assim, torna-se relevante avaliar conjuntamente esses parâmetros e verificar se o efeito da relação a/c depende da composição granulométrica adotada. Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar a influência conjunta da distribuição granulométrica do agregado graúdo e da relação água/cimento sobre as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas do concreto permeável.

2. Materiais e métodos

2.1 Materiais

Os concretos foram produzidos com cimento Portland CP II-F-32, agregados graúdos e água potável. O cimento apresentou massa específica de 3,14 g/cm³, determinada conforme a ABNT NBR 16605:2017. As demais características, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do Cimento Portland CP II F-32

Parâmetro	Valor
Tempo de início de pega (horas)	> 1
MgO (%)	-
Perda ao fogo (%)	< 12,5
Resíduo insolúvel (%)	< 7,5
SO ₃ (%)	< 4,5
Resistência à compressão (MPa)	
1 dia	-
3 dias	> 10,0
7 dias	> 20,0
28 dias	> 32,0

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante 1

Foram utilizadas duas frações de agregado graúdo, denominadas brita 0 (b0) e brita 1 (b1), além de uma composição mista (bm), constituída por 50% de cada fração, em massa. As distribuições granulométricas foram determinadas conforme a ABNT NBR 17054:2022 e estão apresentadas na Figura 1.

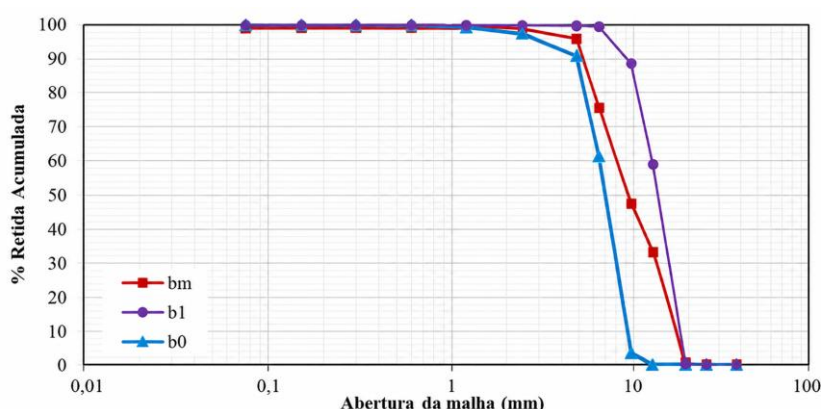


Figura 1 – Curvas granulométricas dos agregados utilizados

Os parâmetros granulométricos e as propriedades físicas dos agregados, determinados conforme a NBR 16972 (ABNT, 2021), estão apresentados na Tabela 2. Os diâmetros

correspondentes a 10% e 60% passantes (D_{10} e D_{60} , respectivamente) foram obtidos a partir das curvas granulométricas, e o coeficiente de uniformidade (C_u) foi calculado pela relação D_{60}/D_{10} .

Tabela 2 – Caracterização física e granulométrica dos agregados

Propriedade	b0	b1	bm
Massa unitária (kg/m^3)	1500	1670	1610
Massa específica (kg/m^3)	2870	2900	2880
Absorção de água (%)	1,71	1,34	1,53
D_{60} (mm)	7,30	15,00	12,00
D_{10} (mm)	4,85	9,40	5,50
Coeficiente de uniformidade (-)	1,51	1,60	2,18
Dimensão máxima característica (mm)	9,50	19,00	19,00
Módulo de finura (-)	5,91	6,89	6,37

2.2 Métodos

2.2.1 Produção e moldagem

O programa experimental considerou duas relações água/cimento, 0,30 (C1) e 0,35 (C2), e três composições granulométricas do agregado graúdo: 100% brita 0 (b0), 100% brita 1 (b1) e composição mista com 50% de cada fração, em massa (bm), totalizando seis traços (Figura 2). As relações a/c foram definidas com base em faixas usualmente empregadas para concretos permeáveis e em estudos anteriores.

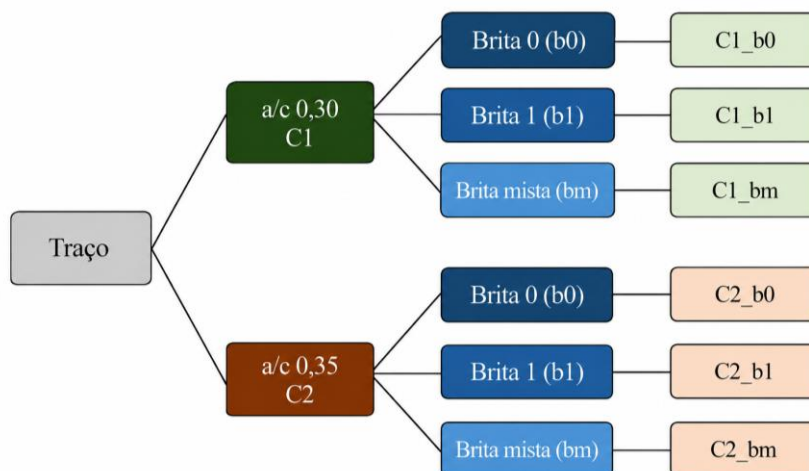


Figura 2 – Delineamento experimental dos traços de concreto permeável

Adotou-se proporção cimento:agregado graúdo de 1:4, em massa. Os consumos de materiais de cada traço estão apresentados na Tabela 3. Antes da produção, os agregados foram secos em estufa a $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ até constância de massa e resfriados à temperatura ambiente. A mistura foi realizada com os agregados na condição seca, sem correção da água de amassamento em função da absorção; portanto, a relação a/c corresponde à razão entre a massa total de água adicionada e a massa de cimento.

Tabela 3 – Consumo dos materiais e relação a/c

Concreto	Cimento (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Água (L)	a/c
C1_b0	6,87	27,49	-	2,06	0,30
C1_b1	6,92	-	27,68	2,08	0,30
C1_bm	6,89	13,79	13,79	2,07	0,30
C2_b0	6,70	26,81	-	2,35	0,35
C2_b1	6,75	-	27,00	2,36	0,35
C2_bm	6,73	13,45	13,45	2,35	0,35

A mistura foi realizada em betoneira de eixo inclinado. Inicialmente, o agregado graúdo e metade da água foram misturados por 2 minutos; em seguida, adicionou-se o cimento e procedeu-se à mistura por 1 minuto. Por fim, incorporou-se a água restante, com mistura adicional por 2 minutos. Para cada traço, foram moldados quinze corpos de prova cilíndricos de 100 × 200 mm. O concreto foi lançado em duas camadas de volumes aproximadamente iguais, cada uma adensada manualmente com 12 golpes de haste distribuídos uniformemente. Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram protegidos contra perda de umidade por (24 ± 6) h, sendo posteriormente desmoldados e curados por imersão em água saturada com cal até 28 dias.

2.2.2 Caracterização dos concretos

Aos 28 dias, os concretos foram avaliados quanto às suas propriedades. Os ensaios realizados, o número de corpos de prova e as respectivas normas técnicas estão apresentados na Tabela 4 e ilustrados na Figura 3.

Tabela 4 – Ensaios de caracterização dos concretos permeáveis

Análise	Propriedade	n	Norma
Física	Absorção de água, índice de vazios e massa específica	5	NBR 9778:2009
Mecânica	Resistência à compressão	5	NBR 5739:2018
	Resistência à tração por compressão diametral	5	NBR 7222:2011
Hidráulica	Coefficiente de permeabilidade à carga variável	5	NBR 14545:2021 ¹
	Fluxo de água	5	NBR 14545:2021 ¹

Nota: n = número de corpos de prova avaliados por composição em cada ensaio. ¹Procedimento adaptado

Dos quinze corpos de prova produzidos para cada composição, cinco foram destinados ao ensaio de resistência à compressão, cinco ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral e cinco à determinação das propriedades físicas e hidráulicas.

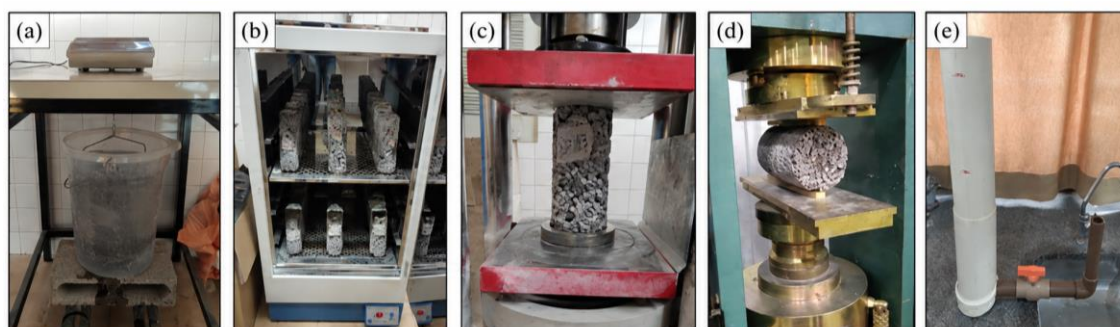


Figura 3 – Ensaios: (a), (b), absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente; (c) resistência à compressão; (d) resistência à tração por compressão diametral; e (e) permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade foi determinado pelo método de carga variável, adaptado da ABNT NBR 14545:2021, com base nos procedimentos empregados por Neithalath *et*

al. (2006) e Hölitz (2011). O permeâmetro, constituído por tubos rígidos de PVC, possuía corpo principal com 100 mm de diâmetro interno e 200 mm de comprimento e reservatório de água com diâmetro interno de 97 mm (área de 73,90 cm²). Foram adotadas cargas hidráulicas inicial (h_1) e final (h_2) de 250 e 100 mm, respectivamente. Antes do ensaio, os corpos de prova permaneceram no sistema preenchido com água por 3 minutos. Em seguida, determinou-se o tempo de escoamento entre h_1 e h_2 , realizando-se três determinações consecutivas por corpo de prova. O tempo médio foi utilizado no cálculo do coeficiente de permeabilidade (k), conforme a Equação 1.

$$k = \frac{aH}{A\Delta t} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (1)$$

em que: k é o coeficiente de permeabilidade (cm/s); a é a área transversal interna do reservatório de água (cm²); H é a altura do corpo de prova (cm); A é a área da seção transversal do corpo de prova (cm²); Δt é o tempo médio de escoamento entre as cargas h_1 e h_2 (s); e h_1 e h_2 são, respectivamente, as cargas hidráulicas inicial e final (cm).

A partir das mesmas determinações, calculou-se o fluxo de água, expresso em L/(min·m²), pela razão entre a vazão volumétrica e a área transversal do corpo de prova (A). A vazão foi calculada pela relação entre o volume escoado e o tempo médio das três determinações (Δt), sendo o volume obtido pelo produto entre a área interna do reservatório (a) e a variação da carga hidráulica ($h_1 - h_2$).

2.2.3 Análise estatística

A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk. Para as variáveis com distribuição normal, aplicou-se análise de variância (ANOVA), seguida do teste de Tukey. Para as demais, empregou-se o teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste de Dunn com ajuste de Benjamini-Hochberg. Adotou-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$). As análises foram realizadas no *software* R.

3. Resultados e discussão

Os valores médios de absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente dos concretos permeáveis estão apresentados nas Figuras 4, 5 e 6, respectivamente. As barras de erro representam os desvios-padrão.

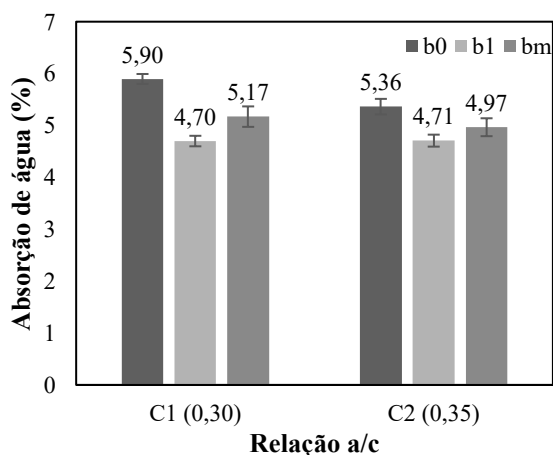


Figura 4 – Absorção de água

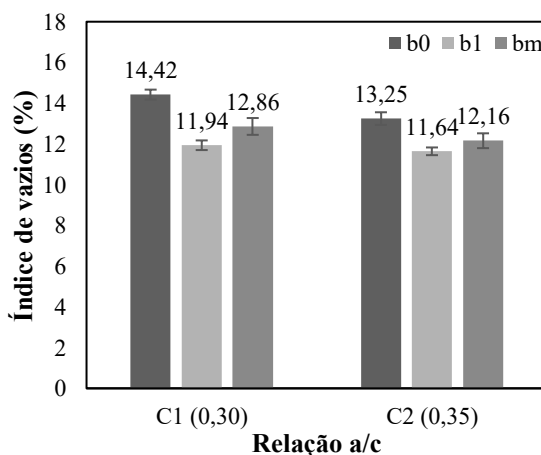


Figura 5 – Índice de vazios

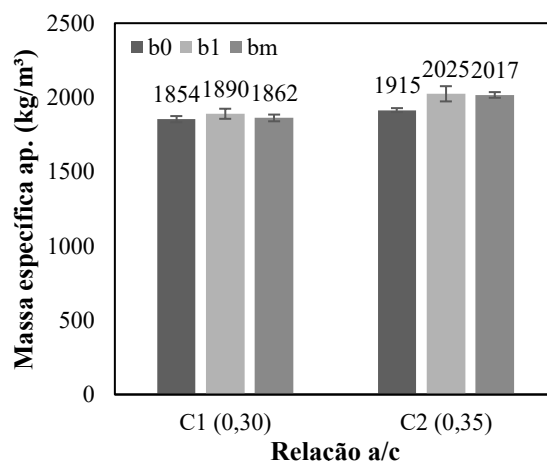


Figura 6 – Massa específica aparente seca

A absorção de água e o índice de vazios apresentaram comportamento semelhante entre as composições. Para a relação a/c de 0,30, a absorção variou entre 4,70% e 5,90% e o índice de vazios entre 11,94% e 14,42%; para a relação a/c de 0,35, os respectivos intervalos foram de 4,71% a 5,36% e de 11,64% a 13,25%. Em ambas as relações a/c, os concretos produzidos com brita b0 apresentaram os maiores valores médios, brita b1 os menores e brita bm valores intermediários. A ANOVA indicou diferenças significativas entre os seis traços ($p < 0,05$), e as comparações múltiplas pelo teste de Tukey permitiram identificar os efeitos associados à composição granulométrica e à relação a/c.

Para a relação a/c de 0,30, as três composições granulométricas diferiram significativamente entre si quanto à absorção e ao índice de vazios ($p < 0,05$). Para a relação a/c de 0,35, as diferenças foram menos pronunciadas: para a absorção, b0 diferiu de b1 e bm ($p < 0,001$), enquanto b1 e bm foram estatisticamente semelhantes ($p = 0,0846$); para o índice de vazios, b0 diferiu de b1 ($p < 0,001$), mas não foram observadas diferenças entre b0 e bm ($p = 0,1096$) ou entre b1 e bm ($p = 0,8527$). Assim, a influência da distribuição granulométrica sobre essas propriedades foi mais evidente para a menor relação a/c.

O efeito da relação a/c também dependeu da composição granulométrica. O aumento de 0,30 para 0,35 reduziu significativamente a absorção apenas em b0 ($p < 0,001$), enquanto b1 e bm não apresentaram alterações significativas. Para o índice de vazios, foram verificadas reduções significativas em b0 ($p < 0,001$) e bm ($p = 0,0138$), mas não em b1 ($p = 0,6364$). Portanto, a alteração da relação a/c não produziu efeito uniforme sobre as propriedades físicas.

As diferenças observadas podem estar associadas ao arranjo do esqueleto granular e à quantidade de pasta disponível para recobrimento e ligação das partículas. A menor dimensão característica de b0 resulta em maior número de partículas e maior área superficial a ser recoberta para uma mesma massa de agregado. Em contrapartida, a composição bm combina as duas frações e apresenta distribuição granulométrica mais ampla ($CU = 2,18$), modificando o empacotamento e a configuração dos vazios intergranulares. Deve-se considerar, ainda, que os agregados foram incorporados na condição seca, sem correção da água de amassamento em função da absorção. A maior absorção de b0 (1,71%) em relação a b1 (1,34%) pode ter contribuído para sua maior sensibilidade à alteração da relação a/c; contudo, essa interpretação constitui uma hipótese, uma vez que a quantidade de água efetivamente absorvida durante a mistura não

foi determinada.

A massa específica aparente variou entre 1854 e 1890 kg/m³ para a relação a/c de 0,30 e entre 1915 e 2025 kg/m³ para a relação a/c de 0,35. Como o pressuposto de normalidade não foi atendido por um dos grupos, empregou-se o teste de Kruskal-Wallis, que indicou diferença global significativa entre os seis traços ($p < 0,001$). Entretanto, as comparações múltiplas pelo teste de Dunn, com ajuste de Benjamini-Hochberg, não identificaram diferenças significativas entre as granulometrias dentro de uma mesma relação a/c, nem entre as duas relações a/c para uma mesma composição ($p > 0,05$). Desse modo, embora os valores médios tenham aumentado com a relação a/c de 0,35, essa tendência não foi estatisticamente confirmada.

A relação entre a massa específica aparente e o índice de vazios apresentou comportamento coerente entre as composições. A brita b1 apresentou os menores índices de vazios nas duas relações a/c, de 11,94% para C1 e 11,64% para C2, e, simultaneamente, as maiores massas específicas aparentes, de 1890 e 2025 kg/m³, respectivamente. Em contraste, b0 apresentou os maiores índices de vazios (14,42% e 13,25%) e as menores massas específicas aparentes (1854 e 1915 kg/m³). A composição mista apresentou comportamento intermediário para ambas as propriedades. Esses resultados indicam uma relação inversa entre o índice de vazios e a massa específica aparente, associada ao arranjo do esqueleto granular e ao grau de preenchimento do volume do concreto.

As resistências à compressão e à tração por compressão diametral são apresentadas nas Figuras 7 e 8, respectivamente. As barras de erro representam os desvios-padrão obtidos para cada composição.

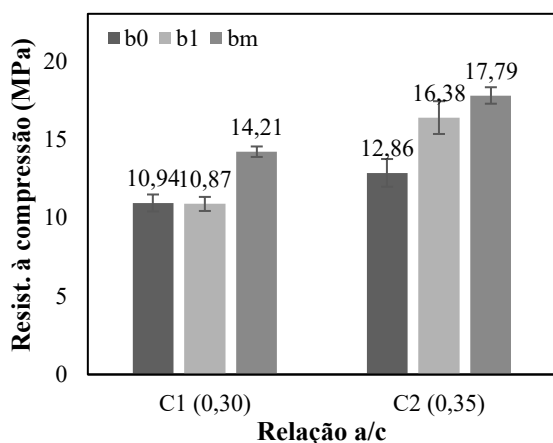


Figura 7 – Resistência à compressão

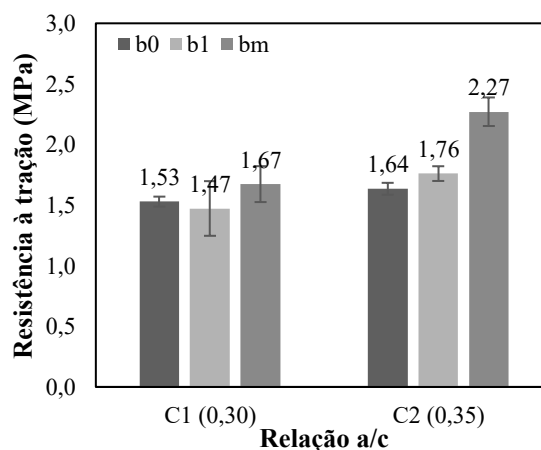


Figura 8 – Resistência à tração

Para a resistência à compressão, o concreto produzido com a composição de britas bm apresentou as maiores médias nas duas relações a/c, com 14,21 MPa para C1 e 17,79 MPa para C2. Em C1, as composições com brita b0 e brita b1 apresentaram valores próximos, de 10,94 e 10,87 MPa, respectivamente; em C2, as resistências aumentaram para 12,86 MPa em b0 e 16,38 MPa em b1. Assim, embora bm tenha apresentado sistematicamente os maiores valores médios, a magnitude do efeito da granulometria variou com a relação a/c.

O aumento da relação a/c foi acompanhado por incrementos médios de aproximadamente

18%, 51% e 25% na resistência à compressão de b0, b1 e bm, respectivamente, mas apenas b1 apresentou diferença significativa entre C1 e C2 ($p = 0,0152$). Esse resultado é particularmente relevante porque, para b1, o aumento da resistência de 10,87 para 16,38 MPa ocorreu com pequena alteração do índice de vazios, de 11,94% para 11,64%, indicando que o desempenho mecânico não esteve associado exclusivamente à porosidade total. A formação dos contatos intergranulares e a distribuição da pasta entre as partículas podem ter contribuído para esse comportamento.

Comportamento semelhante foi observado na resistência à tração por compressão diametral. Entre C1 e C2, os valores aumentaram de 1,53 para 1,64 MPa em b0, de 1,47 para 1,76 MPa em b1 e de 1,67 para 2,27 MPa em bm. Enquanto em C1 os resultados permaneceram em uma faixa relativamente estreita, entre 1,47 e 1,67 MPa, em C2 houve maior diferenciação entre as composições, com destaque para bm.

Os resultados médios do coeficiente de permeabilidade e do fluxo são apresentados nas Figuras 9 e 10, respectivamente. As barras de erro representam os desvios-padrão obtidos para cada composição. Como ambas as grandezas foram determinadas a partir dos mesmos tempos de escoamento e sob as mesmas condições hidráulicas, apresentaram comportamento equivalente; assim, o coeficiente de permeabilidade foi adotado como principal parâmetro de interpretação, e o fluxo como medida complementar.

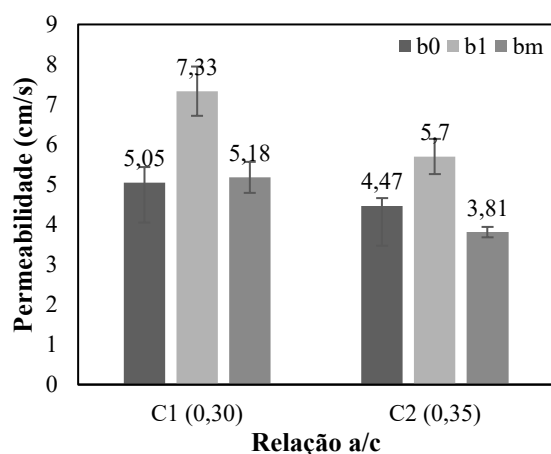


Figura 9 – Coeficiente de permeabilidade

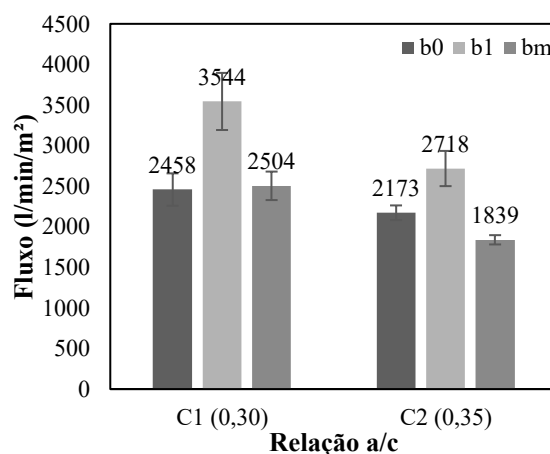


Figura 10 – Fluxo

O concreto produzido com a brita b1 apresentou a maior capacidade de percolação nas duas relações a/c. Para C1, foram obtidos coeficientes de permeabilidade de 5,05, 7,33 e 5,18 cm/s para b0, b1 e bm, respectivamente, correspondentes a fluxos de 2458,05, 3543,85 e 2504,25 L/(min·m²). Para C2, os respectivos coeficientes foram de 4,47, 5,70 e 3,81 cm/s, com fluxos de 2172,51, 2717,52 e 1839,45 L/(min·m²).

A ANOVA aplicada ao coeficiente de permeabilidade indicou diferenças significativas entre os seis traços ($p < 0,05$). Em C1, o concreto produzido com a brita b1 apresentou permeabilidade significativamente superior ao produzido com a brita b0 e bm ($p < 0,001$), enquanto aqueles produzidos com brita b0 e bm foram estatisticamente semelhantes. Em C2, b1 também apresentou permeabilidade superior a b0 ($p < 0,001$) e bm ($p = 0,0134$), sem diferença significativa entre b0 e bm ($p = 0,1684$). Dessa forma, a maior capacidade de percolação de b1 foi estatisticamente confirmada para ambas as relações a/c.

O concreto produzido com a brita b1 apresentou simultaneamente os menores índices de vazios e os maiores coeficientes de permeabilidade, enquanto aquele produzido com brita

b0 apresentou maior volume de vazios e menor capacidade de percolação. Portanto, nas condições avaliadas, o índice de vazios não determinou isoladamente o comportamento hidráulico. A dimensão e, principalmente, a conectividade e a tortuosidade dos poros influenciam a formação dos caminhos preferenciais de escoamento, conforme reportado por Shan *et al.* (2022) e Rieg, Pinheiro e Pinheiro (2025).

A comparação entre as brita b1 e bm reforça a influência da distribuição granulométrica. Embora ambas apresentem dimensão máxima característica de 19 mm, bm possui distribuição mais ampla ($CU = 2,18$) que b1 ($CU = 1,60$). A incorporação da fração de menor dimensão em bm pode ter modificado a geometria dos vazios e aumentado a complexidade dos caminhos de escoamento, contribuindo para sua menor permeabilidade.

O aumento da relação a/c de 0,30 para 0,35 foi acompanhado por reduções de aproximadamente 11%, 22% e 26% no coeficiente de permeabilidade de b0, b1 e bm, respectivamente. Entretanto, a redução foi estatisticamente significativa apenas para b1 ($p < 0,001$); b0 ($p = 0,2629$) e bm ($p = 0,1162$) não apresentaram diferenças significativas. Para b1, essa redução ocorreu simultaneamente ao aumento significativo da resistência à compressão, caracterizando de forma mais evidente o compromisso entre desempenho mecânico e hidráulico. Tendência semelhante entre aumento da resistência e redução da permeabilidade em função de alterações da estrutura porosa foi observada por Lyu, Dai e Chen (2024).

Os coeficientes de permeabilidade variaram entre 3,81 e 7,33 cm/s, valores superiores ao limite de 0,10 cm/s estabelecido pela ABNT NBR 16416:2015 para pavimentos permeáveis. Ressalta-se, entretanto, que o presente estudo empregou ensaio de carga variável adaptado da ABNT NBR 14545:2021, procedimento distinto daquele previsto pela ABNT NBR 16416:2015, de modo que os valores não representam uma verificação direta de conformidade com essa norma. De forma análoga, as taxas de drenagem apresentadas pela ACI 522R-10 (ACI, 2010) correspondem a faixas típicas de concretos permeáveis, e não a critérios normativos de aceitação. Os fluxos obtidos, entre 1839,45 e 3543,85 L/(min·m²), superaram as faixas usualmente reportadas, sendo essa diferença associada, entre outros fatores, às condições hidráulicas e aos procedimentos empregados na determinação do fluxo.

4. Conclusões

Os resultados evidenciaram que a relação água/cimento e a composição granulométrica influenciaram de maneira distinta as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos concretos permeáveis. Nas condições experimentais avaliadas, destacam-se as seguintes conclusões:

- A composição com brita 1 apresentou maior capacidade de percolação nas duas relações a/c avaliadas, enquanto a composição mista apresentou sistematicamente as maiores resistências médias à compressão e à tração.
- O índice de vazios, isoladamente, não foi suficiente para explicar a capacidade de percolação, indicando que o desempenho hidráulico também está associado à configuração e à conectividade da estrutura porosa.
- Os efeitos da relação a/c variaram conforme a composição granulométrica, sendo seu aumento associado à tendência de maior desempenho mecânico e de redução

da capacidade de percolação.

Assim, a dosagem do concreto permeável deve buscar o equilíbrio entre resistência mecânica e desempenho hidráulico, considerando conjuntamente a relação a/c e a granulometria do agregado em função dos requisitos da aplicação pretendida.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.* Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 17054. Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio.* Rio de Janeiro, 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, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.* Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral.* Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 14545: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade à carga variável.* Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *ABNT NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto — Requisitos e procedimentos.* Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 16972: Agregados – Determinação das propriedades físicas.* Rio de Janeiro, 2021.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE.** *ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete.* Farmington Hills: ACI, 2010.
- ADRESI, M.; YAMANI, A.; TABARESTANI, M. K.; ROOHOLAMINI, H.** *A comprehensive review on pervious concrete.* *Construction and Building Materials*, v. 407, 133308, 2023.
- ADRESI, M.; SHIRGIR, B.; NAGHERZADEH, A.** *Porous concrete pavement.* *Road*, v. 30, n. 111, p. 83–96, 2022.
- ALTUKI, R.; LEY, M.; COOK, D.; GUDIMENTTLA, M.; PRAUL, M.** *Increasing sustainable aggregate usage in concrete by quantifying the shape and gradation of manufactured sand.* *Construction and Building Materials*, v. 321, 125593, 2022.
- CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P.** *Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: a state-of-the-art review.* *Construction and Building Materials*, v. 111, p. 262–274, 2016.
- DEBNATH, B.; SARKAR, P. P.** *Pervious concrete as an alternative pavement strategy: a state-of-the-art review.* *International Journal of Pavement Engineering*, v. 21, n. 12, p. 1516–1531, 2020.
- HÖLTZ, F. C.** *Concreto permeável: estudo experimental de dosagem e propriedades mecânicas e hidráulicas.* Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- LI, L. G.; FENG, J. J.; LU, Z. C.; XIE, H. Z.; XIAO, B. F.; KWAN, A. K. H.; JIAO, C. J.** *Effects of aggregate bulking and film thicknesses on water permeability and strength of pervious concrete.* *Powder Technology*, v. 396, p. 743–753, 2022.
- LYU, Q.; DAI, P.; CHEN, A.** *Correlations among physical properties of pervious concrete with different aggregate sizes and mix proportions.* *Road Materials and Pavement Design*, v. 25, n. 12, p. 2747–2771, 2024.

NEITHALATH, N.; WEISS, J.; OLEK, J. *Characterizing enhanced porosity concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance.* *Cement and Concrete Research*, v. 36, n. 11, p. 2074–2085, 2006.

PIOTROWSKA, E.; MALECOT, Y.; KE, Y. *Experimental investigation of the effect of coarse aggregate shape and composition on concrete triaxial behavior.* *Mechanics of Materials*, v. 79, p. 45–57, 2014.

PIMENTEL, L. F.; LOPES, D. S.; OLIVEIRA, C. F.; CARNEIRO, J. A.; CASTRO, R. E.; MELO, U. P.; VASCONCELOS, E. R.; SANTOS, A. G. *Influence of pore structure on permeability and flexural strength of pervious concrete slabs.* *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 17, n. 2, e17205, 2024.

RIEG, A. F.; PINHEIRO, I. G.; PINHEIRO, A. *Analysis of the porous system structure, permeability coefficient and mechanical resistance of pervious concrete.* *Matéria*, v. 30, e20240570, 2025. DOI: 10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0570.

SANDOVAL, G. F. B.; GALO BARDES, I.; DIAS, C.; CAMPOS, A.; TORALLES, B. M. *Mechanical and hydraulic performance of pervious concrete: a review.* *Journal of Building Engineering*, v. 45, 103459, 2022.

SHAN, J.; ZHANG, Y.; WU, S.; LIN, Z.; LI, L.; WU, Q. *Influence of pore connectivity on permeability of pervious concrete.* *Construction and Building Materials*, v. 325, 126740, 2022.

SHTREPI, L.; ASTOLFI, A.; BADINO, E.; VOLPATTI, G.; ZAMPINI, D. *More than just concrete: acoustically efficient porous concrete with different aggregate shape and gradation.* *Applied Sciences*, v. 11, n. 11, 4835, 2021.

WU, J.; THOMPSON, D. *Quantifying impervious surface changes using satellite imagery.* *Environmental Management*, v. 52, p. 113–123, 2013.

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

YU, F.; GUO, J.; LIU, J.; CAI, H.; HUANG, Y. *A review of the pore structure of pervious concrete: analyzing method, characterization parameters and the effect on performance.* *Construction and Building Materials*, v. 365, 129971, 2023.

ZHANG, J.; LENG, Z. *Permeable pavement performance under various conditions: a review.* *Journal of Cleaner Production*, v. 144, p. 195–210, 2017.

ZHOU, Y.; JIN, H.; WANG, B. *Modeling and mechanical influence of meso-scale concrete considering actual aggregate shapes.* *Construction and Building Materials*, v. 228, 116785, 2019.