XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8762

Correlação entre a porosidade e os mecanismos de transporte dentro das dimensões topológicas de cobrimento e interior de concretos

Correlation of porosity and transport mechanisms within the topological dimensions of concrete cover and interior

Ana Carolina Sousa Soares de Castro
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | anacarolinasoaresdecastr@gmail.com
Hanaelly Garcia do Carmo Hilario
Instituto Federal de Goiás | Formosa| Brasil |hilario.hanaelly@ifg.edu.br
Oswaldo Cascudo
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | ocascudo@ufg.br
Helena Carasek
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | hcarasek@ufg.br

Resumo

A porosidade e a permeabilidade impactam diretamente a durabilidade de estruturas de concreto. Este estudo analisa a estrutura porosa superficial (cobrimento) e interna de quatro tipos de concreto via Adsorção de Nitrogênio (BET-BJH). Os dados foram correlacionados com ensaios de permeabilidade (técnicas CEMBUREAU e TORRENT). Foram avaliados três traços de referência, variando a relação água/cimento (0,45; 0,55 e 0,65), e um traço com 10% de sílica ativa em substituição ao cimento (a/lig 0,45). Após 126 dias de cura, verificou-se que a permeabilidade ao ar do cobrimento (TORRENT) é substancialmente maior do que a do interior (CEMBUREAU), embora a porosidade total tenha sido maior no interior na maioria dos traços. Obteve-se uma forte correlação (R^2 = 0,97) entre a porosidade e a permeabilidade do cobrimento através das técnicas BET e TORRENT, evidenciando a fragilidade da camada superficial frente à penetração de agentes agressivos.

Palavras-chave: Porosidade, Permeabilidade, Adsorção de Nitrogênio, CEMBUREAU, TORRENT.

Abstract

Porosity and permeability directly impact the durability of concrete structures. This study analyzes the surface (cover) and internal pore structure of four concrete types using Nitrogen Adsorption (BET-BJH). Results were correlated with permeability tests using the CEMBUREAU and TORRENT techniques. Four mixtures were evaluated: three reference mixes with varying water/cement ratios (0.45, 0.55, and 0.65), and one containing 10% silica fume as a cement replacement (w/b 0.45). After 126 days of curing, the air permeability of the cover layer (TORRENT) was found to be substantially higher than that of the interior (CEMBUREAU), although total porosity was higher in the interior for most mixtures. A strong correlation (R^2 = 0.97) was observed between cover porosity and permeability through BET and TORRENT techniques, highlighting the vulnerability of the surface layer to the penetration of aggressive agents.

CASTRO, A. C. S. S.; HILARIO, H. G. C.; CASCUDO, O.; CARASEK, H. Correlação entre a porosidade e os mecanismos de transporte dentro das dimensões topológicas de cobrimento e interior de concretos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

Keywords: Porosity, Permeability, Nitrogen Adsorption, CEMBUREAU, TORRENT.

INTRODUÇÃO

A durabilidade dos materiais à base de cimento é uma das principais preocupações na engenharia civil, e a permeabilidade é uma das principais propriedades a serem avaliadas [1]. Tanto a porosidade quanto a permeabilidade são parâmetros de durabilidade, pois avaliam a resistência do concreto à entrada de substâncias agressivas [2, 19]. O concreto possui estrutura porosa complexa, com poros de gel e capilares, bem conectados, facilitando a passagem de água e fluidos, além de vazios de ar incorporados ou aprisionados, que são isolados [3, 4, 5, 6].

A permeabilidade é a capacidade de um material permitir a passagem de fluidos sob um gradiente de pressão. Concretos de baixa permeabilidade são geralmente mais duráveis, pois limitam a penetração de agentes agressivos [7]. As redes porosas são os principais canais de transporte de agentes agressivos em materiais cimentícios. A velocidade de transporte e o caminho do meio ativo dependem significativamente das características desta rede [8]. Por isso, entender a morfologia dos poros é importante para elucidar os parâmetros de durabilidade das estruturas de concreto.

Embora a permeabilidade aumente com a porosidade, a porosidade isolada não a determina por completo. A permeabilidade é influenciada pela distribuição de tamanhos dos poros, tortuosidade, conectividade da rede, superfície específica e presença de microfissuras [9], características afetadas pela relação a/c, pela distribuição granulométrica e pela exposição a agentes agressivos [10].

Sendo assim, o objetivo deste artigo é analisar a estrutura porosa de diferentes concretos por meio da técnica de adsorção de nitrogênio (BET-BJH) e compará-la com a permeabilidade obtida nos ensaios CEMBUREAU e TORRENT, examinando a heterogeneidade entre os parâmetros da estrutura porosa em duas posições dos corpos de prova: cobrimento (camada superficial) e interior. Foram analisados concretos de cimento Portland com diferentes relações água/ligante (0,45; 0,55 e 0,65) e, adicionalmente, um concreto com relação a/lig 0,45 com 10% do cimento substituído, em massa, por sílica ativa.

MÉTODO

Para a dosagem dos materiais cimentícios, utilizaram-se cimento Portland CP II F-40, agregado miúdo (areia natural quartzosa de leito de rio) e agregado graúdo (rocha britada granítica, brita 1). Em todas as dosagens utilizou-se aditivo superplastificante à base de policarboxilatos. A sílica ativa foi utilizada em pó.

Os corpos de prova foram moldados como vigas prismáticas (10 × 10 × 40 cm) para a porosidade e como cilindros (Ø10 × 20 cm e Ø15 × 30 cm) para a permeabilidade, sendo desmoldados 24 horas após a moldagem. Foram mantidos em câmara úmida por 126 dias, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015).

As variáveis independentes estudadas foram: tipo de concreto (4 níveis: 3 com cimento Portland nas relações a/c 0,45; 0,55 e 0,65 e um com 10% de sílica ativa em substituição ao cimento, com a/lig 0,45) e a posição de amostragem nos corpos de prova (cobrimento e interior).

As variáveis dependentes foram os métodos de avaliação da permeabilidade (TORRENT e CEMBUREAU) e da porosidade (BET). Foram realizados ensaios complementares de resistência à compressão [11], módulo de elasticidade [12], resistividade elétrica superficial [13], resistividade elétrica volumétrica [14] e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas [15]. As Tabelas 1 e 2 apresentam a dosagem e parte dos ensaios complementares.

Tabela 1: Dosagem utilizada na pesquisa.

Nomenclatura	Relação a/lig	Consumo de cimento (kg/m³)	Traço em massa de cimento (c: ad: a: b)	Aditivo (%)	Abatimento do tronco de cone (cm)
RF45	0,45	470,50	1,00: 0,00: 2,07: 2,16	0,50	14,00
SF45	0,45	423,45	0,90: 0,10: 2,07: 2,16	0,60	16,00
RF55	0,55	428,28	1,00: 0,00: 2,41: 2,20	0,50	11,30
RF65	0,65	344,99	1,00: 0,00: 2,95: 2,50	0,70	10,00

Fonte: o(a) autor(a).

TORRENT

O método Torrent é uma técnica não destrutiva para medir a permeabilidade ao ar do concreto [20]. O experimento foi realizado no LABITECC-UFG, com equipamento fabricado pela Proceq (Figura 1), conforme a SIA 262-1 [16]. Aplica-se uma pressão negativa controlada à amostra, gerando fluxo de ar pelos poros e capilares.

Figura 1: Equipamento de permeabilidade ao ar Torrent.



Fonte: o(a) autor(a).

Os corpos de prova (Ø15 × 30 cm) foram removidos da câmara úmida e secos a 50 °C até constância de massa. A câmara de célula dupla foi posicionada sobre as superfícies dos CPs cilíndricos para criar a pressão negativa necessária. O ensaio iniciou-se quando a pressão atingiu cerca de 30 mbar, com duração de 360 s ou até a pressão interna atingir 20 mbar.

Foram obtidos: tempo de ensaio (t, em s); pressão da câmara interna (pi, em mbar); coeficiente de permeabilidade ao ar do cobrimento (kT, em m²), calculado com as equações de Hagen-Poiseuille combinadas com a de Clapeyron [17]; e a profundidade de penetração do vácuo (L, em mm).

Método CEMBUREAU

O experimento foi conduzido no LABITECC-UFG. As amostras (Ø5 × 30 cm) foram pré-condicionadas conforme a RILEM TC 116-PCD [18].

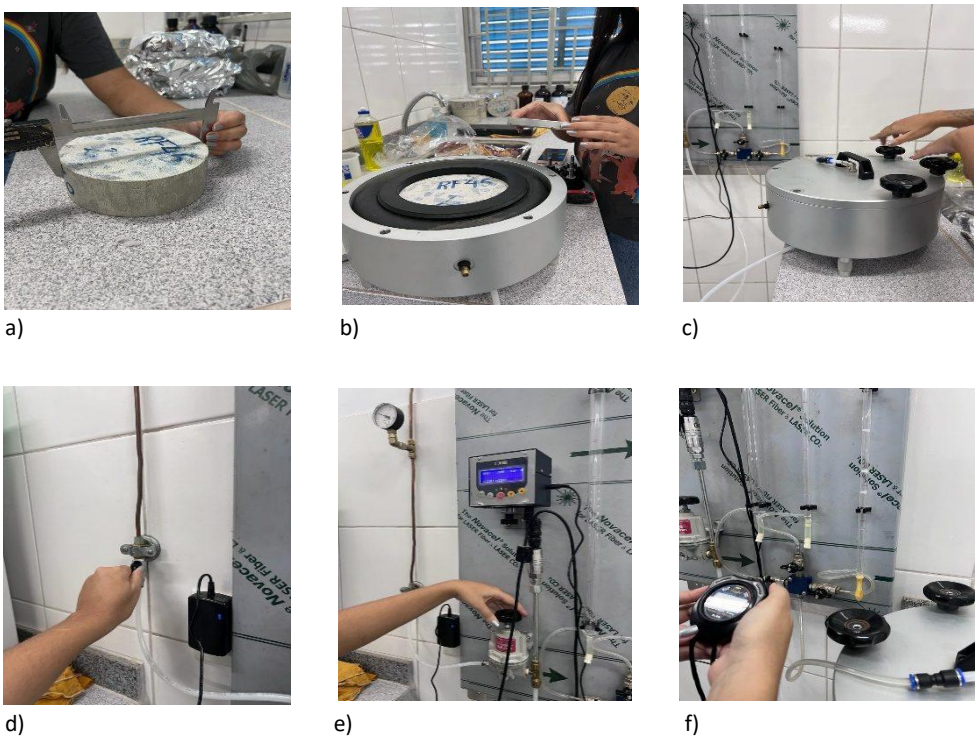
O pré-condicionamento envolveu pré-secagem e redistribuição da umidade em ambiente com (75 ± 2)% UR e (20 ± 1) °C. As amostras foram saturadas em câmara úmida e levadas à estufa a 105 °C até constância de massa, calculando-se o teor de água evaporável e a concentração de massa evaporável.

As laterais dos CPs foram seladas com resina acrílica à prova d'água. As amostras foram então levadas à estufa a 50 °C até a perda de massa desejada (precisão de 5%), seladas com dois sacos de polipropileno e um saco BOPP, e transferidas para sala a (20 ± 1) °C.

O ensaio CEMBUREAU consiste em aplicar pressão de entrada de oxigênio na célula contendo a amostra, até atingir o estado estacionário. Foram utilizados três estágios de pressão absoluta: 1,5 bar; 2,0 bar e 3,0 bar. Após a estabilização, foram realizadas medições da taxa de fluxo Qi em cada estágio.

A seguir, a Figura 2 apresenta as etapas da medição da permeabilidade pelo método CEMBUREAU.

Figura 2: a) Medição do diâmetro da amostra; b) Amostra inserida no equipamento; c) Equipamento sendo montado; d) Abertura da válvula superior; e) Abertura da válvula inferior; f) Cronometragem.



a) b) c)

d) e) f)

Fonte: o(a) autor(a).

Adsorção de Nitrogênio - BET

A adsorção de nitrogênio (BET) é uma técnica para determinação da área superficial específica de materiais porosos, baseada na adsorção física de nitrogênio em diferentes pressões. As moléculas de gás se acumulam em camadas sobre a superfície porosa à medida que a pressão aumenta. O experimento foi realizado no laboratório de química de Furnas Centrais Elétricas, com o aparelho Autosorb® iQ-MP/XR (Figura 3), da Quantachrome®.

Figura 3: Aparelho utilizado para o ensaio BET.



Fonte: o(a) autor(a).

As amostras foram obtidas pela perfuração das vigas prismáticas (10 × 10 × 40 cm) com serra copo de Ø2,5 cm e seccionadas em cortadeira de precisão, resultando em amostras de 9 × 9 × 15 mm para cobrimento e interior.

Após interrupção da hidratação, as amostras foram desgaseificadas sob vácuo de 3,75 × 10^{-10} mmHg a 40 °C por 24 h. Foram então submersas em nitrogênio líquido a 77 K para a captação dos 40 pontos experimentais de adsorção/dessorção, com os dados coletados pelo software ASiQwin™.

RESULTADOS

Os resultados foram submetidos à análise estatística. Pelo Statistica 10.0 foram realizados testes de verificação de resultados espúrios (Dixon), de significância (ANOVA) e post hoc (Duncan) para comparação múltipla de médias. As Tabelas 2 e 3 apresentam numericamente os principais resultados obtidos.

Tabela 2: Ensaios adicionais realizados.

Nomenclatura	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Resistividade superficial (kΩcm)	Resistividade volumétrica (kΩcm)	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (m/s)
RF45	38,01	13,07	7,96	4656
SF45	39,50	108,84	62,86	4680
RF55	34,85	8,65	9,44	4567
RF65	26,96	8,43	8,90	4638

Fonte: o(a) autor(a).

Tabela 3: Resultado dos ensaios de permeabilidade e porosidade.

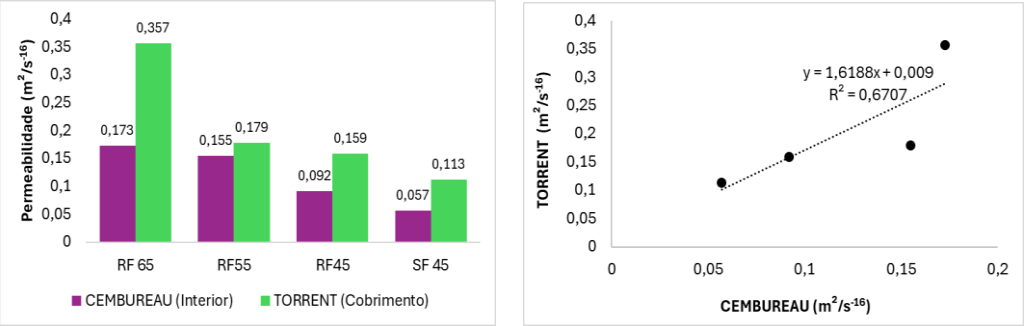
Nomenclatura	BET - Porosidade interior (cm^3/g)	BET - Porosidade cobrimento (cm^3/g)	TORRENT (m^2/s^{-16})	CEMBUREAU (m^2/s^{-16})
RF45	0,0562	0,038	0,159	0,092
SF45	0,027	0,034	0,113	0,057
RF55	0,05	0,036	0,179	0,155
RF65	0,064	0,052	0,357	0,173

Fonte: o(a) autor(a).

PERMEABILIDADE

Os resultados de permeabilidade ao gás obtidos pelos métodos CEMBUREAU e TORRENT (Figura 4a) apresentam tendências semelhantes. Em ambos, a maior permeabilidade foi observada na amostra com maior relação a/l (RF65) e a menor na amostra com sílica ativa (SF45). A adição de sílica ativa reduziu a permeabilidade em aproximadamente 70% em ambos os métodos, promovendo maior durabilidade.

Figura 4: a) Resultados de permeabilidade CEMBUREAU e TORRENT; b) Correlação entre os métodos.



a) b)

Fonte: o(a) autor(a).

Há diferença estatisticamente significativa (IC 95%) entre os resultados de TORRENT e CEMBUREAU: a permeabilidade do cobrimento é significativamente maior do que a do interior. Pelo agrupamento múltiplo de médias, foi possível distinguir os resultados de acordo com o tipo de ensaio, a relação a/lig e a inserção de sílica ativa.

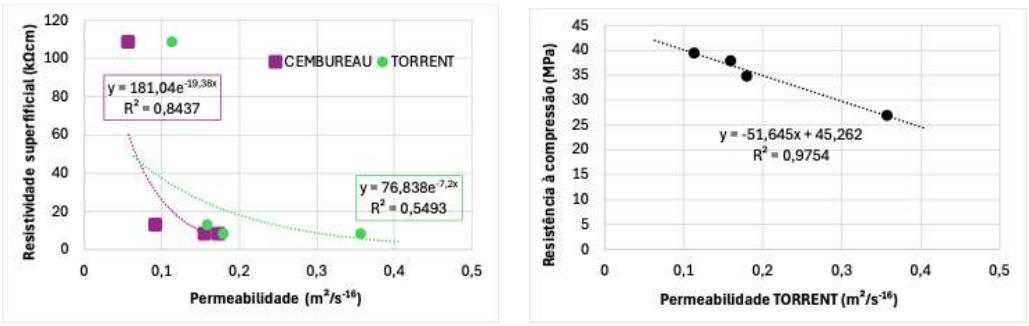
Os valores de permeabilidade do TORRENT (na camada superficial) foram entre 15% e 106% maiores (em média, cerca de 70%) do que os do CEMBUREAU (na camada interior). Existe correlação entre os métodos (R^2 = 0,67), conforme a Figura 4b.

Pelo critério de Bjegović *et al.* [22], o CEMBUREAU classifica a qualidade em três categorias (boa, normal e ruim) e o TORRENT em cinco (de muito bom a muito ruim).

Todos os resultados pelo CEMBUREAU situam-se entre 10^{-18} e 10^{-16} m^2 (qualidade normal); pelo TORRENT, entre 0,1 e 1,0 (também normal). Apesar da mesma classificação, os valores do TORRENT chegam a corresponder ao dobro dos do CEMBUREAU, à exceção do RF55.

Quanto aos ensaios complementares, a Figura 5a mostra a relação entre a permeabilidade e a resistividade superficial: em ambos os métodos há correlação negativa, quanto maior a permeabilidade, menor a resistividade.

Figura 5: a) Correlação entre as permeabilidades CEMBUREAU/TORRENT e a resistividade superficial; b) Correlação entre a permeabilidade pelo método de TORRENT e a resistência à compressão.



a) b)

Fonte: o(a) autor(a).

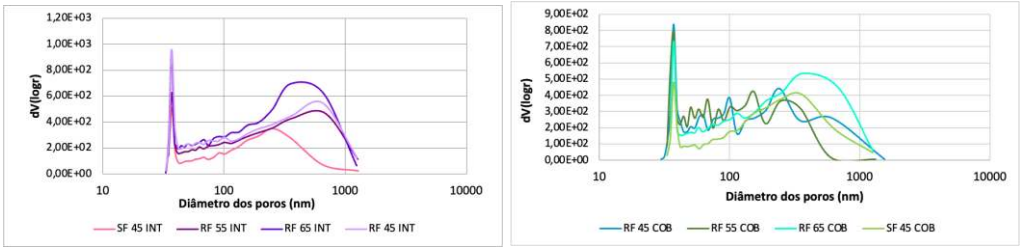
As curvas de tendência ajustadas têm equações exponenciais distintas. Foram observadas boas correlações entre as permeabilidades e os ensaios de resistividade superficial e resistência à compressão (Figuras 5a e 5b).

A melhor correlação ocorre entre a permeabilidade pelo CEMBUREAU e a resistividade elétrica superficial. Como o TORRENT mede a permeabilidade do cobrimento, esperava-se que sua correlação com a resistividade superficial fosse maior, o que não foi observado, possivelmente devido às heterogeneidades do concreto na área do cobrimento, que refletem as diferenças topológicas do material, além da influência das condições de umidade da camada superficial sobre a medida de permeabilidade [21].

POROSIDADE

A Figura 6 apresenta os resultados de porosidade pelo método BET, com volume de poros (dV/log r) em função do diâmetro dos poros, para o interior e o cobrimento.

Figura 6: Porosidade a partir do ensaio BET. a) Interior; b) Cobrimento.



a) b)

Fonte: o(a) autor(a).

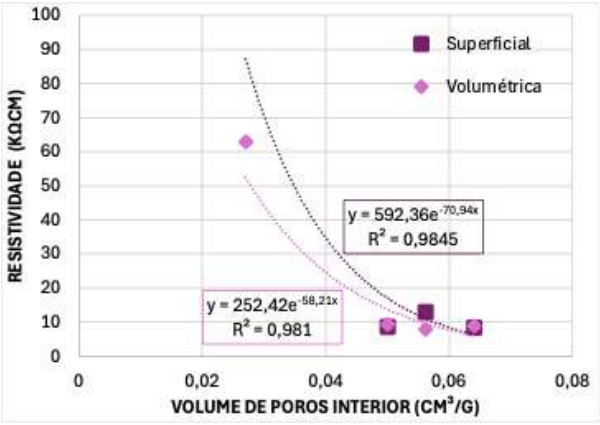
O interior e o cobrimento apresentam porosidade variável, corroborando a ideia de uma rede de poros complexa, com distribuição de tamanhos diferente ao longo do material. O interior (Figura 6a) apresenta maiores volumes de poros do que o

cobrimento (Figura 6b) na maioria dos traços, em coerência com os valores da Tabela 3, enquanto o cobrimento apresenta maior variabilidade na distribuição de tamanhos de poros. Essa heterogeneidade do cobrimento ocorre porque a parte externa está mais sujeita a interferências (secagem, variações de temperatura) e ao efeito parede, fatores que favorecem a conectividade da rede porosa superficial e ajudam a explicar a maior permeabilidade dessa camada, ainda que seu volume total de poros seja menor. Vale destacar que a maior porosidade registrada no interior refere-se à técnica BET, que se limita aos poros de menores dimensões e não detecta poros fechados, de modo que não representa a totalidade da porosidade da amostra.

Todas as curvas apresentam um pico inicial mais acentuado em torno de 30–40 nm, indicando predominância de poros menores. Os traços com sílica ativa apresentam refinamento dos poros (Figura 6a), e os traços com maior relação a/lig (RF65 COB e INT) apresentam poros maiores. Os traços RF55 INT e RF65 INT apresentam maior volume de poros acima de 100 nm, indicando uma microestrutura mais porosa.

Quando comparados aos ensaios complementares, observam-se excelentes correlações entre o volume de poros do interior e a resistividade (Figura 7), tanto superficial (R^2 = 0,98) quanto volumétrica (R^2 = 0,98). Em escala exponencial, a resistividade depende diretamente da porosidade. Os ensaios de resistividade podem, portanto, predizer a porosidade do concreto, ainda que indiretamente.

Figura 7: Correlação entre o volume de poros das amostras e a resistividade superficial e volumétrica.

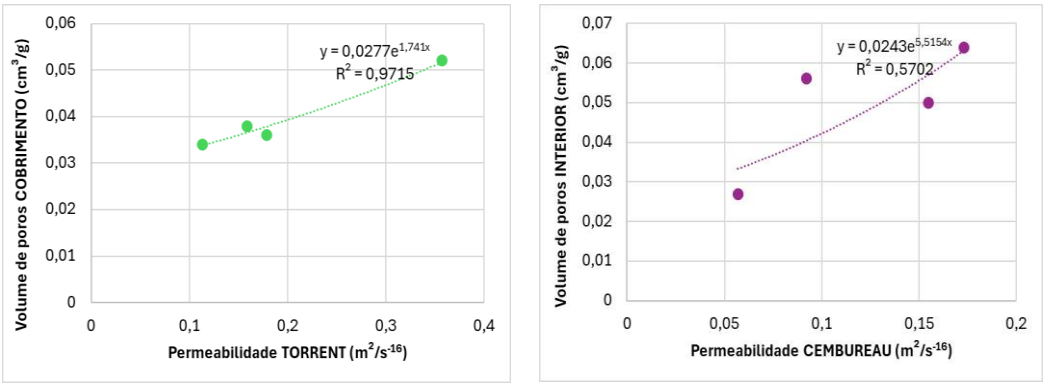


Fonte: o(a) autor(a).

PERMEABILIDADE X POROSIDADE

Para analisar a relação entre permeabilidade ao gás e porosidade, foram feitas correlações entre os resultados de porosidade interna pelo BET e a permeabilidade pelo CEMBUREAU (Figura 8b) e entre a porosidade do cobrimento pelo BET e a permeabilidade pelo TORRENT (Figura 8a). A permeabilidade do cobrimento apresenta melhores correlações com a porosidade do cobrimento (R^2 = 0,97) do que a permeabilidade do interior (CEMBUREAU) com a porosidade interna (R^2 = 0,57).

Figura 8: a) BET cobrimento X TORRENT; b) BET interior X CEMBUREAU.



a) b)

Fonte: o(a) autor(a).

A Figura 8a mostra uma relação exponencial crescente entre a permeabilidade (TORRENT) e o volume de poros do cobrimento, com alto coeficiente de determinação. O transporte de fluidos no cobrimento é fortemente influenciado pela porosidade da camada externa, o que pode afetar a durabilidade do concreto ao permitir maior penetração de agentes agressivos. Destaca-se que, embora o volume total de poros tenha sido menor no cobrimento do que no interior, a permeabilidade da camada superficial foi sistematicamente superior, o que indica que a conectividade e a estrutura da rede porosa, e não apenas o seu volume total governam o transporte de fluidos nessa região.

A Figura 8b mostra que a relação entre a permeabilidade pelo CEMBUREAU e o volume de poros internos apresenta um comportamento exponencial semelhante, porém com menor coeficiente de correlação de Pearson. Outros fatores influenciam o transporte de fluidos no interior do concreto. A porosidade isolada pode não explicar completamente os mecanismos de transporte; é preciso avaliar a permeabilidade em relação à tortuosidade, à distribuição, à conectividade dos poros capilares, ao tamanho das gargantas dos poros, à morfologia e à fractalidade.

CONCLUSÃO

A relação água/ligante exerce impacto significativo sobre a permeabilidade e a porosidade, conforme indicado pela literatura. A adição de sílica ativa mostrou-se uma estratégia eficaz, reduzindo significativamente ambas.

Os métodos TORRENT e CEMBUREAU apresentaram valores significativamente distintos, embora ambos se enquadrem na classificação normal de qualidade. Observou-se diferença notável entre a porosidade interna e a do cobrimento, com maiores volumes de poros no interior na maioria dos traços, ainda que a permeabilidade do cobrimento tenha sido superior, confirmando a complexidade da estrutura porosa e evidenciando a necessidade de avaliações específicas tanto na camada superficial quanto no interior das estruturas.

Os ensaios complementares de resistividade e resistência apresentaram boas correlações com a permeabilidade e a porosidade, indicando a possibilidade de uso de métodos não destrutivos para estimar essas propriedades de forma prática e econômica.

A permeabilidade do cobrimento apresenta melhor correlação com a porosidade do cobrimento ($R^2 = 0,97$) do que com a do interior ($R^2 = 0,57$). A porosidade isoladamente pode não fornecer explicação completa para a permeabilidade em concretos de cimento Portland, é fundamental correlacioná-la com tortuosidade, conectividade dos poros capilares, tamanho das gargantas, distribuição granulométrica, morfologia e fractalidade.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Aneel - Furnas, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, o segundo autor utilizou o CLAUDE FABLE 5 para a revisão gramatical do texto. Após a utilização da ferramenta, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] SHI, J.; QIAN, R.; WANG, D.; LIU, Z.; CHUN, Q.; ZHANG, Y. ‘’Experimental study on gas permeability of cement-based materials’’, Cement and Concrete Composites, v. 129, May. 2022.

[2] LAFHAJ, Z.; GOUEYGOU, M.; DJERBI, A.; KACZMAREK, M. ‘’Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content’’, Cement and Concrete Research, v. 36, n. 4, pp. 625-633, Apr. 2006.

[3] ROUQUEROL, J.; AVNIR, D.; FAIRBRIDGE C. W.; EVERETT, D. H.; HAYNES, J. H.; PERNICONE, N.; RAMSAY, J. D. F.; SING, K. S. W.; UNGER, K. K. ‘’Recommendations for the characterization of porous solids’’. Pure and Applied Chemistry, v. 66, n. 8, p. 1739-1758, 1994.

[4] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: microstructure, properties, and materials. 3 ed., New York; London, McGraw-Hill, 2006.

[5] ALIGIZAKI, K. K. Pore structure of cement-based materials: Testing, interpretation and requirements, 1 ed., London; New York, Taylor & Francis, 2006.

[6] XIONG, Q. X.; TONG, L.-Y.; MEFTAH, F.; ZHANG, Y.; LIU, Q. F.’’ Improved predictions of permeability properties in cement-based materials: A

comparative study of pore size distribution-based models'', Construction and Building Materials, v. 411, Jan. 2024.

[7] OLLIVIER, J. P; VICHOT, A. Durabilidade do Concreto: bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. O. Cascudo, H. Carasek, (Ed. Trad.). São Paulo: IBRACON, 2014.

[8] YU, Z.; NI, C.; TANG, M.; SHEN, X. Relationship between water permeability and pore structure of Portland cement paste blended with fly ash. Construction and Building Materials, v. 175, p. 458–466, 2018.

[9] CHEN, W; LI, K; WU, M; LIU, D; WANG, P; LIANG, Y.'' Influence of pore structure characteristics on the gas permeability of concrete'', Journal of Building Engineering. Vol 79, 2023.

[10] PHUNG, U. T.; MAES, N.; DE SCHUTTER, G.; JACQUES, D.; YE, G. ''Determination of water permeability of cementitious materials using a controlled constant flow method', Construction and Building Materials, v. 47, pp. 1488-1496, Oct. 2013.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 2018.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. 2008.

[13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. G57:2012 - Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. 2012.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9204: Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrico-volumétrica - Método de ensaio. 2012.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. 2019.

[16] SIA: SCHWEIZER NORM 262-1: Betonbau – Erganzende Festlegungen. Annexe E:Perméabilité á l'air dans les structures, p. 52, 2014.

[17] TORRENT, R. J.; HUHES, J. J.; BARTOS, P. J. M. Methods for measuring and assessing the characteristics of the concrete cover on site. Report No 516, Office Fédéral des Routes, Zurich, 1995.

[18] RILEM:TC116-PCD. Tests for gas permeability of concrete. B: Measurement of the gas permeability of concrete by the RILEM-CEMBUREAU method. Materials and Structures. 1999; 32:176-178, France, 1999.

[19] ORTIZ-MARQUÉS, A.; CALDEVILLA, P.; GOLDMANN, E.; SAFUTA, M.; FERNÁNDEZ-RAGA, M.; GÓRSKI, M. ''Porosity and permeability in construction materials as key parameters for their durability and performance: a review'', Buildings, v. 15, n. 18, 2025.

[20] PTACEK, L.; STRAUSS, A.; GRBA, D. et al. ''Performance based concrete quality assessment with gas permeability testing on site'', Frontiers in Built Environment, v. 10, 2024.

[21] NGUYEN, M. H.; NAKARAI, K. ''An enhanced air permeability model based on stable moisture conditions for nondestructive durability assessment'', Materials and Structures, v. 58, n. 164, 2025.

[22] BJEGOVIĆ, D.; SERDAR, M.; OSLAKOVIĆ, I. S.; JACOBS, F.; BEUSHAUSEN, H.; ANDRADE, C.; MONTEIRO, A. V.; PAULINI, P.; NANUKUTTAN, S. Test methods for concrete durability indicators. In: BEUSHAUSEN, H.; FERNANDEZ LUCO, L. (Ed.). Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability: State-of-the-Art Report RILEM TC 230-PSC. Dordrecht: Springer, 2016. p. 51-105.