



AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE COMO PARÂMETRO DE INVESTIGAÇÃO DE CONCRETOS

SANTOS, Thaís Carvalho (1); LOPE, Anne Neiry de Mendonça (2)

(1) Instituto Federal Goiano, engthaisc@gmail.com

(2) Furnas, anne@furnas.com.br

RESUMO

A permeabilidade é considerada uma propriedade de extrema importância para a durabilidade das estruturas de concreto, pois através dela pode ocorrer a entrada de agentes agressivos e a deterioração dessas estruturas. Além disso, tal parâmetro pode acusar a ocorrência de alterações e patologias que interfiram na vida útil do material ou colaborar na avaliação da qualidade e durabilidade de um modo geral. Nesse contexto, buscou-se o estudo envolvendo as propriedades de transporte de massa de concretos convencionais com relação água/ligante igual a 0,4 e 0,6. A permeabilidade foi tomada como principal parâmetro, visando a análise comparativa da utilização de água e gás como fluido percolante. A absorção total e por capilaridade dos concretos também foram avaliadas, além da resistência à compressão e módulo de elasticidade. Os resultados evidenciaram a melhoria da qualidade do concreto com a redução da relação a/lig, tanto em relação às propriedades de transporte de massa, quanto em relação às propriedades mecânicas, em decorrência das importantes alterações no sistema de poros. Comparativamente, os resultados mostraram que a permeabilidade à água e ao gás do concreto podem diferir significativamente. A utilização de gás no ensaio, além de proporcionar uma execução mais fácil e rápida, distinguiu melhor o desempenho entre os dois concretos, sugerindo maior sensibilidade relativa ao ensaio e um forte potencial de utilização em avaliações práticas de concretos com baixa permeabilidade.

Palavras-chave: Permeabilidade, Concreto, Durabilidade, Vida útil, Cembureau.

ABSTRACT

Permeability is considered an extremely important property for the durability of concrete structures, because through it can occur the entry of aggressive agents and deterioration of these structures. In addition, this parameter may indicate the occurrence of alterations and pathologies that interfere with the material's lifespan or collaborate in the evaluation of quality and durability in general. In this context, we sought the study involving the mass transport properties of conventional concrete with water / binder ratio equal to 0.4 and 0.6. Permeability was taken as the main parameter, aiming at the comparative analysis of the use of water and gas as percolating fluid. The total absorption and capillarity of the concretes were also evaluated, besides the compressive strength and modulus of elasticity. The results evidenced the improvement of the concrete quality with the reduction of the w / b ratio, both in relation to the mass transport properties and in relation to the mechanical properties, due to the important changes in the pore system. Comparatively, the results showed that the water and gas permeability of concrete can differ significantly. The use of gas in the test, in addition to providing easier and faster execution, better distinguished performance between the two concretes, suggesting greater test sensitivity and a strong potential for use in practical evaluations of low permeability concretes.

Keywords: Permeability, Concrete, Durability, Lifespan, Cembureau.

1 INTRODUÇÃO

No meio técnico-científico há uma preocupação constante com a durabilidade do concreto e com a sua interação com o meio no qual a estrutura está inserida. De uma forma geral, a durabilidade dos concretos está relacionada diretamente com os mecanismos de transporte de fluidos dentro do material, pois todos os possíveis mecanismos de deterioração que podem afetar as estruturas de concreto envolvem processos de transporte gasosos ou líquidos.

A permeabilidade é considerada uma propriedade de extrema importância para a durabilidade das estruturas de concreto e, de forma geral, os fluidos percolantes podem ser classificados como gases ou líquidos. Há muitas décadas o estudo da permeabilidade à água tem sido alvo de grande interesse para a quantificação e previsão de processos de transporte de umidade no concreto, por exemplo, no caso de estruturas submersas ou de barramento. No mesmo sentido, a permeabilidade ao gás pode ser representada em estruturas de concreto expostas à atmosfera, as quais devem ter uma baixa permeabilidade para evitar a carbonatação. Outro exemplo é o de estruturas que confinam rejeitos radioativos e requerem menor permeabilidade de modo a reduzir o risco de emissão de radiação.

Mas o interesse no estudo da permeabilidade deixou de ser somente relativo à ocorrência prática do fenômeno propriamente dito e passou a ter mais relevância por fornecer indicativo da qualidade do concreto e se tratar de um parâmetro representativo em relação à durabilidade de um modo geral¹. Como está relacionada com as características da estrutura porosa do material, além do tipo de fluido percolante, a avaliação da permeabilidade pode prover indicativo do estado de conformação das partículas e das condições microestruturais do concreto, podendo acusar a ocorrência de fissuras, descontinuidades, reações, deteriorações, entre outras alterações²⁻⁴. Logo, tal propriedade tem potencial na avaliação tanto da durabilidade e potencial de degradação do material ao longo da sua vida útil, como na avaliação da qualidade da produção e de danos ao concreto.

Diversos autores apontam diferenças quando a permeabilidade é medida utilizando água ou gás e, inclusive, favorecem a permeabilidade ao gás como mais atrativa na avaliação das propriedades de transporte de materiais cimentícios. Isso porque medições precisas da permeabilidade à água tornam-se lentas e mais difíceis à medida que a qualidade do concreto melhora, em contraste com o ensaio com gás que, além de mais fácil de executar, requer menos tempo de ensaio e produz resultados mais reproduzíveis. Além disso, processos físico-químicos podem ocorrer durante o ensaio de permeabilidade à água pelos fenômenos de interação entre a água e a matriz, causando a alteração da estrutura dos materiais cimentícios^{5, 6}.

Os valores de permeabilidade dos concretos são relativamente baixos e, dada a crescente evolução no desempenho de concretos e suas permeabilidades cada vez menores, fazem-se necessários métodos sensíveis o suficiente para detectar com precisão o desempenho relativo desse produto. As normas brasileiras, relativamente desatualizadas em relação aos documentos internacionais, prescrevem somente a avaliação da permeabilidade do concreto à água e não há uma norma brasileira referente ao ensaio de permeabilidade ao gás, de forma a nortear pesquisas científicas e prestações de serviços.

Nesse contexto, buscou-se o estudo envolvendo as propriedades de transporte de massa no concreto e a permeabilidade foi tomada como principal parâmetro, visando a análise comparativa da utilização de água e gás como fluido percolante e a contribuição com a medida desse importante indicador de durabilidade. A absorção total e por capilaridade dos concretos também foi avaliada, além das propriedades mecânicas.

Dessa forma, o estudo atua como forma de colaboração na discussão quanto à permeabilidade ao gás de concretos e na sua aplicação na avaliação da vida útil e patologias em edifícios. Além disso, constitui oportunidade de eventuais modificações positivas, incluindo a discussão e concepção de uma normativa brasileira que proporcione ao meio técnico e científico prescrições quanto à determinação da permeabilidade ao gás de concretos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos materiais e proporcionamento dos concretos

Os concretos, cujos traços e propriedades no estado fresco estão especificados no Quadro 1, foram determinados para 2 níveis de resistência, representados pelas relações água/ligante (a/lig) nominais de 0,4 e 0,6. De forma a obter uma trabalhabilidade adequada, foram utilizados aditivos polifuncional e superplastificante. Os valores de abatimento situaram-se dentro do intervalo proposto de 140 ± 20 mm e os concretos apresentaram-se coesos e viscosos.

Quadro 1 - Traços dos concretos estudados

| a/lig | Cimento CPV-ARI (kg/m ³) | Traço em massa | Aditivos ¹ | | Propriedades no estado fresco | | |
|-------|--------------------------------------|------------------|-----------------------|-----|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| | | | PF | SP | Teor de ar incorporado (%) | Massa específica (kg/m ³) | Abatimento (mm) |
| 0,4 | 403 | 1: 2,32: 2,09 | 0,85 | 0,5 | 3,2 | 2372,6 | 145 |
| 0,6 | 265 | 1: 3,55: 3,73 | 0,85 | 0,4 | 3,4 | 2362,1 | 125 |

¹ Teor (%) em relação à massa de cimento.

Fonte: Própria

Foi utilizado o cimento CPV-ARI, com massa específica e resistência à compressão aos 7 dias iguais a 3,16 g/cm³ e 35,3 MPa, respectivamente. Foi utilizado agregado gráudo natural saturado com superfície seca (SSS) com dimensão máxima característica (DMC) de 25 mm, massa específica igual a 2,64 g/cm³ e absorção de 0,7%, e areia natural SSS com massa específica igual a 2,63 g/cm³, DMC igual a 4,75 mm, módulo de finura igual a 2,81, e absorção de 0,5%.

2.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

2.2.1 Permeabilidade à água

O coeficiente de permeabilidade à água foi obtido conforme a NBR 10786:2013⁷. A Figura 1 ilustra o processo de preparação e execução do ensaio, realizado aos 182 dias, utilizando 3 corpos de prova cilíndricos de 15x15 cm, extraídos da região central de corpos de prova de 15x30 cm. No ensaio, a água é forçada (aplicação de pressão no sistema) através do corpo de prova para medir a velocidade de percolação. A vazão é determinada repetidas vezes, por vários dias, fazendo com que o ensaio completo tenha duração de cerca de 500 horas.

Figura 1 - Ensaio de permeabilidade à água sob pressão



Fonte: Própria

2.2.2 Permeabilidade ao gás

Para medição de permeabilidade ao gás foi utilizado o método CEMBUREAU, normalizado pelo documento RILEM: TC 116-PCD⁸. O método consiste numa etapa de preparação e pré-condicionamento das amostras para o equilíbrio da umidade interna das amostras com 75% de umidade relativa, seguida do ensaio com aplicação de uma determinada pressão de gás em uma das faces da amostra, em regime permanente, para a determinação da sua vazão de saída.

Durante o ensaio foi utilizado oxigênio como gás percolante, 3 amostras de 50 ± 1 mm de espessura extraídas de corpos de prova distintos e pressões de gás de 1,5 bar, 2,0 bar e 3,0 bar. O cálculo do coeficiente de permeabilidade aparente (K_i) é feito baseado na equação de Hagen-Poiseuille, a qual aborda o fluxo laminar de um fluido compressível através de corpos porosos com pequena capilaridade, sob condições uniformes. O coeficiente médio de permeabilidade ao gás K é determinado considerando a média aritmética dos valores obtidos para cada estágio de pressão e das três amostras. O ensaio completo, cujo equipamento está exposto na Figura 2, durou cerca de 2 horas para os concretos deste estudo.

Figura 2 - Permeâmetro Cembureau. (a) Suprimento de gás; (b) Regulador de pressão com manômetro; c) Célula de ensaio com corpo de prova; (d) Medidores de fluxo; (e) Cronômetro



Fonte: Própria

2.2.3 Parâmetros complementares

Os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram realizados em triplicata segundo a NBR 5739:2007⁹ e a NBR 8522:2017¹⁰ nas idades de 3, 7, 28, 91 e 182 dias. Para tal, os corpos-de-prova tiveram a superfície do topo e base regularizados em retífica e, posteriormente, foram envoltos em filme plástico de polietileno. Os ensaios de absorção por imersão e por capilaridade foram realizados em triplicata, aos 182 dias, seguindo as recomendações da norma NBR 9778:2005¹¹ e NBR 9779:2012¹², respectivamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades mecânicas

No Quadro 2 estão apresentados os resultados médios de resistência à compressão e do módulo de elasticidade dos concretos avaliados nas idades 3, 7, 28, 91 e 182 dias, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados.

Quadro 2 - Resistência à compressão e módulo de elasticidade

| a/lig | Idade (dias) | Resistência à compressão (MPa) | | | Módulo de elasticidade (GPa) | | |
|-------|--------------|--------------------------------|---------------|--------|------------------------------|---------------|--------|
| | | Média | Desvio Padrão | CV (%) | Média | Desvio Padrão | CV (%) |
| 0,4 | 3 | 40,7 | 2,35 | 5,77 | 32,6 | 0,15 | 0,47 |
| | 7 | 54,6 | 1,02 | 1,87 | 34,6 | 1,23 | 3,56 |
| | 28 | 62,0 | 2,54 | 4,09 | 38,2 | 0,21 | 0,55 |
| | 91 | 69,1 | 0,31 | 0,45 | 40,3 | 1,61 | 3,99 |
| | 182 | 63,8 | 5,63 | 8,82 | 35,9 | 0,15 | 0,42 |
| 0,6 | 3 | 23,1 | 1,26 | 5,44 | 27,1 | 0,29 | 1,06 |
| | 7 | 30,4 | 0,41 | 1,36 | 28,2 | 0,45 | 1,61 |
| | 28 | 34,9 | 1,35 | 3,88 | 32,8 | 1,14 | 3,47 |
| | 91 | 38,3 | 0,75 | 1,95 | 33,9 | 1,13 | 3,34 |
| | 182 | 35,5 | 1,09 | 3,06 | 26,9 | 0,05 | 0,19 |

Fonte: Própria

Os resultados mostraram a influência que a relação a/lig e a idade dos concretos exercem sobre as características mecânicas. Nota-se que o concreto com relação a/lig 0,4 apresentou valores médios maiores, em todas as idades e para ambas as propriedades. Além disso, há tendência de crescimento dos valores médios conforme evolução da idade dos concretos, exceto para a idade de 182 dias que, diferente do esperado, forneceu valores médios menores.

Uma investigação realizada identificou como causa uma falha durante a retificação das amostras em tal idade, na qual foi utilizado o capeamento com argamassa de enxofre em vez do desgaste mecânico. O segundo método foi definido no programa experimental por se mostrar uma alternativa interessante para todos os níveis de resistência e a conduta diferente da planejada provavelmente interferiu, subestimando os resultados. Tal conclusão foi obtida a partir de ocorrências anteriores no laboratório e em outros estudos^{13, 14} que foram justificadas pelo fato do capeamento com enxofre não desenvolver, na ocasião do ensaio, resistência superior à resistência do corpo de prova.

Tem-se que quanto mais baixa a relação a/lig melhor é o desempenho dos concretos quanto à resistência à compressão, por causa da menor quantidade de água na mistura, resultando em um índice de vazios reduzido no interior do concreto e módulos de elasticidade maiores, refletindo uma estrutura mais densa e compacta do material^{15, 16}. Observa-se que o valor máximo de resistência para a relação a/lig 0,4 foi de aproximadamente 69 MPa, enquanto para a relação a/lig 0,6 foi de 38,3 MPa, aos 91 dias de idade. Houve, portanto, um incremento da resistência de cerca de 57% ao reduzir a relação a/lig de 0,6 para 0,4. Logo, os

resultados no presente estudo concordam com o padrão esperado. O concreto com relação a/lig igual a 0,4 apresentou valores mais altos de módulo de elasticidade quando comparado ao concreto com a/lig igual a 0,6, com valor máximo igual a 40,3 GPa e 33,9 GPa, aos 91 dias, respectivamente.

3.2 Absorção total e por capilaridade

A absorção total de água por imersão e o índice de vazios dos concretos são bons indicadores da porosidade aberta acessível à água desse material. Os resultados médios desses indicadores, bem como a massa específica dos concretos, aos 182 dias, são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão total

| a/lig | Absorção (%) | | Índice de vazios (%) | | Massa específica (kg/dm ³) | |
|-------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|--|--------|
| | Média (Desvio Padrão) | CV (%) | Média (Desvio Padrão) | CV (%) | Média (Desvio Padrão) | CV (%) |
| 0,6 | 4,15 (0,03) | 0,71 | 9,55 (0,07) | 0,69 | 2,51 (0,00) | - |
| 0,4 | 2,97 (0,09) | 2,97 | 6,95 (0,19) | 2,72 | 2,54 (0,01) | 0,23 |

Fonte: Própria

Os concretos com relação a/lig igual a 0,4 apresentaram menor absorção e menor índice de vazios quando comparados com os concretos com relação a/lig igual a 0,6. Este resultado é esperado, uma vez que a relação a/lig é determinante e considerada como o principal parâmetro controlador na porosidade do concreto¹⁵. Segundo os critérios de classificação do boletim informativo nº 192 do Comité Euro-internacional du Béton – CEB¹⁷, o concreto com relação a/lig 0,4 apresenta boa qualidade e permeabilidade baixa, enquanto o concreto com a/lig 0,6 é classificado como de qualidade média.

No Quadro 4, encontram-se os resultados dos valores máximos do ensaio de absorção de água por capilaridade das amostras analisadas aos 182 dias. Observa-se maior absorção relativa ao concreto com relação a/lig igual a 0,6, mas ambos os concretos apresentaram valores relativamente próximos. Analisando as alturas de ascensão capilar, é verificado valor máximo referente ao concreto com relação a/lig 0,4. O concreto com a/lig 0,6 teve menor altura de ascensão capilar, mas apesar disso absorveu mais massa de água, indicando maior volume de poros interconectados. Esses resultados permitem a interpretação de que, conforme já era esperado, houve refinamento dos poros e redução do raio dos capilares do concreto com menor relação a/lig, gerando aumento da força de sucção e, conseqüentemente, maior altura capilar média.

Quadro 4 - Resultados médios do ensaio de absorção por capilaridade

| a/lig | Altura capilar (cm) | Água absorvida (g) | Absorção por capilaridade (g/cm ²) | Desvio Padrão (g/cm ²) | CV (%) |
|-------|---------------------|--------------------|--|------------------------------------|--------|
| 0,6 | 4,03 | 34,28 | 0,44 | 0,08 | 17,95 |
| 0,4 | 4,43 | 30,80 | 0,39 | 0,04 | 9,76 |

Fonte: Própria

3.3 Permeabilidade ao gás x permeabilidade à água

Os coeficientes de permeabilidade ao gás e à água dos concretos estudados, aos 182 dias, são apresentados no Quadro 5. Para a permeabilidade ao gás, o concreto com a/lig 0,4 apresenta desempenho superior, com coeficiente de permeabilidade de $1,65 \times 10^{-18} \text{ m}^2$, enquanto o concreto com a/lig 0,6 é mais permeável e tem coeficiente K igual a $11,97 \times 10^{-18} \text{ m}^2$.

Quadro 5 - Coeficientes de permeabilidade à água e ao gás

| a/lig | K _{gás} (x10 ⁻¹⁸ m ²) | Desvio Padrão (x10 ⁻¹⁸ m ²) | CV (%) | K _{água} (x10 ⁻¹² m/s) | Desvio Padrão (x10 ⁻¹² m/s) | CV (%) |
|-------|---|--|--------|--|--|--------|
| 0,4 | 1,65 | 0,15 | 9,28 | 2,78 | 0,12 | 4,39 |
| 0,6 | 11,97 | 0,25 | 2,10 | 5,86 | 0,46 | 7,79 |

Fonte: Própria

Os concretos apresentaram resultados que diferem em cerca de uma ordem de magnitude. O melhor desempenho quanto à permeabilidade conforme menor relação a/lig é um comportamento esperado, pois, de maneira geral, tem-se menor porosidade e baixa conectividade dos poros para os concretos com menor relação a/lig.

Conforme critério apontado por Zaharieva et al.¹⁸, o coeficiente de permeabilidade ao gás de ambos os concretos tem ordem de grandeza dentro do intervalo aceito para o concreto convencional não exposto a ambientes agressivos (de 10^{-18} a 10^{-17} m^2). Já Lee, Mccarthy e Dhir¹⁹, com relação à durabilidade, estabelecem que para valores do coeficiente de permeabilidade ao gás K abaixo de $10 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ o concreto é considerado bom. Nesse ponto de vista, ambos os concretos são considerados bons quanto à durabilidade, isto é, de baixa permeabilidade ao gás.

Quanto à permeabilidade à água, são observados coeficientes com a mesma ordem de grandeza para ambos os concretos. O concreto com relação a/lig 0,6 teve permeabilidade à água cerca de 2 vezes maior e igual a $5,86 \times 10^{-12} \text{ m/s}$, enquanto o de a/lig 0,4 foi igual a $2,78 \times 10^{-12} \text{ m/s}$. O CEB apresenta critérios para a avaliação da permeabilidade à água de concretos¹⁷ e segundo esses critérios, ambos os concretos podem ser

avaliados como de qualidade e permeabilidade média, por apresentarem valores de permeabilidade entre 10^{-12} e 10^{-10} m/s.

Para comparar as permeabilidades obtidas a partir de ensaios usando diferentes fluidos, é necessário definir a permeabilidade intrínseca, dependente somente da estrutura porosa do material, e converter os coeficientes de permeabilidade à água em unidades de m^2 . Para tal, utilizou-se uma abordagem realizada por Bamforth²⁰, que assume que, para a água, o coeficiente de permeabilidade intrínseca em unidades de m^2 é de aproximadamente 10^{-7} vezes o coeficiente, em unidades de m/s. Os coeficientes após a conversão são expostos no Quadro 6.

Quadro 6 - Comparação dos coeficientes de permeabilidade

| a/lig | Permeabilidade à água ($\times 10^{-18} m^2$) | Permeabilidade ao gás ($\times 10^{-18} m^2$) | Kgás/Kágua |
|-------|--|--|------------|
| 0,4 | 0,28 | 1,65 | 5,94 |
| 0,6 | 0,59 | 11,97 | 20,42 |

Fonte: Própria

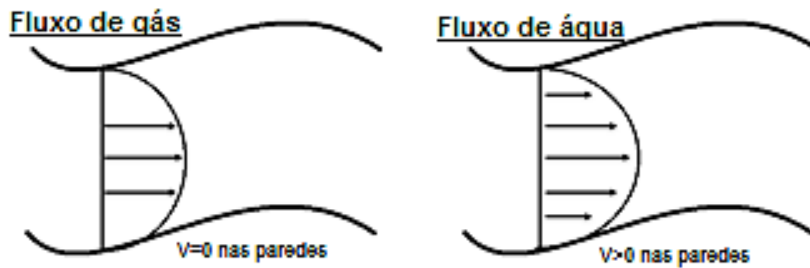
Neville¹⁶ expõe que, teoricamente, o coeficiente de permeabilidade intrínseca em m^2 de um determinado concreto deve ser o mesmo independentemente de ser utilizado gás ou líquido no ensaio. Entretanto, na prática, os gases resultam em maior valor de coeficiente, pois os dois fluxos causam diferentes resistências nas paredes dos poros e, conseqüentemente, o perfil de velocidade do escoamento é diferente num mesmo sistema de poros, em condições análogas. De fato, foi observado valores menores de permeabilidade, na ordem de $10^{-19} m^2$, quando a água foi utilizada como fluido.

A teoria do deslizamento de gás foi identificada como a principal explicação para as diferenças significativas registradas entre os coeficientes de permeabilidade à água e ao gás para o concreto, mesmo quando expressos em termos de coeficiente intrínseco^{16, 20}. Segundo essa teoria (Figura 3), no escoamento de gases não há uma lâmina de fluido nas paredes dos poros e os gases possuem velocidades finitas (maiores que zero) nesse limite, enquanto os líquidos possuem velocidades nulas devido ao atrito²¹. Devido a esse fenômeno, valores maiores de coeficientes de permeabilidade são obtidos quando gases são utilizados como fluido.

Neville¹⁶ afirma que a relação entre a permeabilidade ao gás e a permeabilidade à água (Kgás/Kágua) varia de 6 até 100. Foi observado nesse estudo diferença de 20,4 para o concreto com a/lig 0,6 e 5,9 para o concreto com a/lig 0,4. Bamforth²⁰ estudou quatro tipos de concreto para medir o coeficiente de permeabilidade usando água e nitrogênio e, em todos os casos, a permeabilidade ao gás foi significativamente superior à permeabilidade à água, com a diferença de 5,6 a 78,5, de modo que a diferença aumentava à medida que a permeabilidade era reduzida. Tal

efeito foi explicado pelo fenômeno de deslizamento do gás. Nesse estudo foi utilizada maior faixa de concretos com permeabilidades distintas, cujos valores diferiram de 3 a 4 ordens de grandeza.

Figura 3 - Perfil de velocidade dos fluidos nas paredes dos poros



Fonte: Própria

No presente estudo, observou-se tendência diferente nos resultados, com diferença maior relativa ao concreto mais permeável, com a/lig 0,6. No entanto, a pequena faixa de concretos estudada e com valores relativamente próximos de permeabilidade não permite uma análise aprofundada e a elaboração de uma justificativa confiável a esse respeito. Portanto, os presentes resultados apresentam as diferenças esperadas entre as permeabilidades, com maiores valores de permeabilidade quando utilizada a água como fluido, e relações dentro da faixa de variação esperada, apesar da tendência diferente em relação à maior diferença esperada para concretos menos permeáveis.

Ambos os parâmetros apontaram um desempenho melhor do concreto com a/lig 0,4. Quanto à permeabilidade à água, os resultados para ambos os concretos foram próximos, na mesma ordem de grandeza, demonstrando menor sensibilidade ao distinguir o desempenho entre os dois tipos de concreto. Tem-se, portanto, que o ensaio de permeabilidade ao gás distinguiu melhor a qualidade dos concretos, conforme mencionado anteriormente por outros autores^{6, 20, 22}. Além disso, a avaliação da permeabilidade ao gás foi de mais rápida execução, com resultados satisfatórios quanto à variabilidade e precisão, confirmando tal parâmetro como importante indicador da qualidade do concreto, com potencial de utilização mais corriqueiramente em avaliações quanto à durabilidade.

4 CONCLUSÕES

Os resultados evidenciaram melhoria do concreto com a redução da relação a/lig tanto em relação às propriedades de transporte de massa, quanto em relação às propriedades mecânicas, em decorrência das importantes alterações no sistema de poros do concreto. O concreto com relação a/lig igual a 0,4 possui uma estrutura mais densa e compacta e maior rigidez e resistência mecânica. Além disso, ocorreu refinamento dos poros e menor volume de poros interconectados.

Quanto à avaliação da permeabilidade, os resultados mostraram que, mesmo quando expressa em termos de coeficiente intrínseco, a permeabilidade à água e ao gás ao concreto podem diferir significativamente. A utilização de gás na investigação da durabilidade distinguiu melhor a qualidade e o desempenho entre os dois concretos, sugerindo maior sensibilidade relativa ao ensaio. Além disso, o ensaio de permeabilidade ao gás foi de mais rápida execução e forneceu bons resultados, confirmando tal parâmetro como importante indicador da qualidade do concreto, com potencial de utilização em avaliações práticas pelo meio técnico. Portanto, fica evidenciada a relevância do parâmetro e a contribuição do estudo da permeabilidade ao gás na avaliação da durabilidade do concreto.

REFERÊNCIAS

- ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKOCZYLAS, F.; WIRQUIN, E. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. **Cement And Concrete Composites**, v. 25, n. 2, p. 223-232, 2003.
- STORMONT, J. C. In situ gas permeability measurements to delineate damage in rock salt. **International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences**, v. 34, n. 7, p. 1055-1064, 1997.
- PICANDET, V.; KHELIDJ, A.; BELLEGOU, H. Crack effects on gas and water permeability of concretes. **Cement And Concrete Research**, v. 39, n. 6, p. 537-547, 2009.
- SENTONE, D. T. **Desenvolvimento de método para medida de permeabilidade superficial de revestimento de argamassa**, São Paulo, 2011, dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, 139 f.
- VILLANI, C.; LOSER, R.; WEST, M. J.; DI BELLA, C.; LURA, P.; WEISS, W. J. An inter lab comparison of gas transport testing procedures: Oxygen permeability and oxygen diffusivity. **Cement And Concrete Composites**, v. 53, p. 357-366, 2014.
- BAROGHEL-BOUNY, V. Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials. Part II: Essential tool for assessment of transport properties and for durability prediction. **Cement And Concrete Research**, v. 37, n. 3, p. 438-454, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10786**: Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro, 2013.
- Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages - RILEM. TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability: tests for gas permeability of concrete. (RILEM Recommendation TC 116-PCD). **Materials and Structures**, v. 32, p. 174-179, Apr 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.
- 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, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.
- CHIES, J. A.; SILVA FILHO, L. C. P.; ROHDEN, A. B. Influência do Preparo das Bases de Corpos-de-prova de Concreto por Meio de Retífica em Comparação ao Capeamento com Argamassa de Enxofre, para Diferentes Níveis de Resistência do 64 Concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. **Anais...** . Maceió: Ibracon, 2012. p. 1 - 17.
- MEDEIROS, R.; PEREIRA, B. A.; SIPP, G.; DELFINO, T. Investigation of the influence of different surface regularization methods for cylindrical concrete specimens in axial compression tests. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 3, p. 568-591, 2017.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. HASPARYK, N. P. (Ed. Trad.). 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2015. 912 p. Tradução: Rui Alberto Cremonini.
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON – CEB. Bulletin d'Information. Paris, 1989. n.192.
- ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKOCZYLAS, F.; WIRQUIN, E. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. **Cement And Concrete Composites**, v. 25, n. 2, p. 223-232, 2003.
- LEE, C. Y.; MCCARTHY, M. J.; DHIR, R. K. Intrinsic permeability of fly ash concrete. In: MALHOTRA, V. M. (ed). International Conference on Durability of Concrete, 4th, Sydney, 1997. **Proceedings**. American Concrete Institute, v.1, p. 247-266 (SP-170).
- BAMFORTH, P. B. The relationship between permeability coefficients for concrete obtained using liquid and gas. **Magazine Of Concrete Research**, v. 39, n. 138, p. 3-11, 1987.
- KLINKENBERG, L. J. **The Permeability of Porous Media to Liquids and Gases, in Drilling and Production Practice**. New York: American Petroleum Institute, 1941, p. 200–213.
- ABBAS, A.; CARCASSES, M.; OLLIVIER, JP. Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation. **Materials And Structures**, v. 32, n. 1, p. 3-8, 1999.