

Desafios e oportunidades para conhecer as propriedades dependentes dos mecanismos de transporte nos concretos de alto desempenho

K. Yang^{1,2}, S. Nanukuttan³ , W. J. McCarter⁴ , A. Long³ ,
P. A. M. Basheer^{2*} 

* Autor de Contato: P.A.M.Basheer@leeds.ac.uk

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.301>

Recepção: 03/03/2018 | Aceitação: 04/07/2018 | Publicação: 31/08/2018

RESUMO

Neste artigo, é feita uma revisão dessas técnicas, destacando os desafios e as oportunidades para avaliar as propriedades de transporte do concreto de alto desempenho. O conhecimento do desempenho do concreto estrutural é necessário para propósitos de projeto e conformidade. Uma das fortes vantagens para o uso de concreto de alto desempenho (HPC) é obter uma durabilidade destacada, mas seria errado supor que todos os HPCs podem fornecer, automaticamente, um nível de desempenho desejado. A caracterização in loco das propriedades de permeabilidade do concreto é o meio mais viável para avaliar a durabilidade e tem se tornado cada vez mais importante nos últimos 20 anos. Existe uma variedade de métodos que fornecem uma gama de parâmetros, como, por exemplo, permeabilidade ao ar, absorção de água, absorção capilar, e coeficiente de migração de cloretos.

Palavras-chave: concreto de alto desempenho; permeabilidade; especificação por desempenho; ensaios não destrutivos NDT; confiabilidade.

Citar como: K. Yang, S. Nanukuttan, W. J. McCarter, A. Long, M. Basheer (2018), “Desafios e oportunidades para conhecer as propriedades dependentes dos mecanismos de transporte nos concretos de alto desempenho”, Revista ALCONPAT, 8 (3), pp. 246-263, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.301>

¹ School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, China

² School of Civil Engineering, University of Leeds, United Kingdom.

³ School of Natural and Built Environment, Queen’s University Belfast, United Kingdom.

⁴ School of Energy, Geoscience, Infrastructure and Society, Heriot-Watt University, United Kingdom.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT Internacional A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2019.

Challenges and opportunities for assessing transport properties of high-performance concrete

ABSTRACT

In this paper, a review of techniques is given so that both, the challenges and opportunities for assessing transport properties of high-performance concrete, are highlighted. A knowledge of performance of structural concrete is required for design and compliance purposes. One driving force for the use of high performance concretes (HPC) is enhanced durability yet it would be wrong to assume that all HPCs can deliver the desired performance level. In situ characterisation of the permeation properties of concrete is the most viable means for assessing durability and has become increasingly important over the past 20 years. A variety of methods exist that provide a range of parameters, e.g. air permeability, water absorption rate, sorptivity and chloride migration coefficient.

Keywords: high-performance concrete; permeation properties; performance-based specification; NDT test methods; reliability.

Retos y oportunidades para evaluar las propiedades de transporte del concreto de alto rendimiento

RESUMEN

En este artículo, se realiza una revisión de esas técnicas, destacando los desafíos y las oportunidades para evaluar las propiedades de transporte del concreto de alto desempeño. El conocimiento del desempeño del concreto estructural es necesario para propósitos de diseño y conformidad. Una de las fuertes ventajas para el uso de concreto de alto rendimiento (HPC) es obtener una durabilidad destacada, pero sería erróneo suponer que todos los HPCs pueden ofrecer, automáticamente, un nivel de desempeño deseado. La caracterización in situ de las propiedades de permeabilidad del concreto y el medio más viable para evaluar la durabilidad y se ha vuelto cada vez más importante en los últimos 20 años. Existe una variedad de métodos que presentan una gama de parámetros como, por ejemplo, permeabilidad al aire, absorción de agua, absorción capilar, y coeficiente de migración de cloruros.

Palabras clave: concreto de alto rendimiento; permeabilidad; especificación por rendimiento; ensayos no destructivos NDT; confiabilidad.

Nomenclature

| | |
|------------|--|
| A | área da seção transversal sujeita ao fluxo (m^2) |
| ΔC | diferença de concentração (g / m^3) |
| C | concentração na profundidade x (g / m^3) |
| C_0 | concentração de íons na superfície exposta (g / m^3) |
| D_c | coeficiente de difusão de carbonatação ($m / s^{0.5}$) |
| D_g | coeficiente de difusão de gás (m^2 / s) |
| D_v | coeficiente de difusão de vapor (m^2 / s) |
| D_{is} | coeficiente de difusão do íon (m^2 / s) |
| D_{ia} | coeficiente de difusão (m^2 / s) |
| D_{js} | coeficiente de migração (m^2 / s) |
| D_{in} | coeficiente de migração (m^2 / s) |
| d | profundidade de penetração (m) no instante t (s) |
| d_c | profundidade de carbonatação (m) |
| ΔE | diferença de potencial aplicada (V) |

| | |
|------------|--|
| F | Constante de Faraday (c / mol) |
| ΔH | diferença de pressão expressa em metro coluna de água (m) |
| i | volume absorvido por unidade de área (mm) |
| J_g | fluxo de massa de gás (g / m ² • s) |
| J_v | fluxo de massa de vapor (g / m ² • s) |
| J_s | fluxo de massa iônica (g / m ² • s) |
| J_j | fluxo (kg / m ² • s) |
| K_{gs} | coeficiente de permeabilidade (m ²) |
| K_{gn} | coeficiente de permeabilidade (m / s) |
| K_{ws} | coeficiente de permeabilidade a água (m / s) |
| K_{wn} | coeficiente de permeabilidade (m / s) |
| L | espessura da amostra (m) |
| P_e | pressão a montante (N / m ²) |
| P_s | pressão a jusante (N / m ²) |
| P_i | pressão no início do ensaio (N / m ²) |
| P_t | pressão no final do ensaio (N / m ²) |
| Q_s | vazão, taxa de fluxo volumétrico em estado estacionário (m ³ / s) |
| R | constante universal de gás (J / mol • K) |
| S_w | adsorção capilar dos materiais (mm / min ^{0.5}) |
| S_d | capacidade de sorção (mm / min ^{0.5}) |
| T | temperatura absoluta (K) |
| t | tempo (s) decorrido |
| t_t-t_i | duração do ensaio (s) |
| v | porosidade da amostra (%) |
| V_c | volume da câmara de ensaio (m ³) |
| erf | função de erro |
| x | profundidade de penetração de íons (m) |
| Z_j | carga elétrica |
| μ | viscosidade dinâmica do gás (Ns / m ²) |

1. INTRODUÇÃO

No projeto de estruturas de concreto, a durabilidade e a previsão da vida útil aumentaram em importância nos últimos anos. Isso se deve ao desempenho inadequado da durabilidade de muitas estruturas de concreto armado construídas nas últimas décadas, o que coloca uma pressão considerável nos orçamentos de construção. Este é um problema mundial (Beushausen e Luco, 2016). O uso de concreto de alto desempenho (HPC) é uma abordagem estabelecida para aumentar a durabilidade de estruturas de concreto armado e protendido (Aitcin, 1998). No entanto, com os níveis de desempenho do HPC, ele é frequentemente avaliado em ensaios com base em laboratório, o desempenho de longo prazo das estruturas de concreto em serviço depende, em grande parte, de fatores como a qualidade da construção. Com base nesse cenário, a capacidade de realizar uma avaliação de qualidade precisa e no local da HPC é fundamental.

Quando se discute o ensaio de durabilidade do concreto, são as propriedades de permeabilidade e transporte de massa que são importantes e os termos tais como adsorção¹, difusão, migração, absorção e permeabilidade são utilizados a este respeito. Os ensaios são normalmente realizados

¹ A adsorção não é discutida aqui, pois esse parâmetro não é comumente usado como um indicador de durabilidade.

em corpos de prova cilíndricos de 150 ± 300 mm, utilizando métodos de ensaio padrão, geralmente com a idade de 28 dias. Deve ser lembrado que as propriedades de transporte podem ser determinadas por técnicas laboratoriais e / ou técnicas *in loco* (Basheer et al., 2008, McCarter et al., 2017). As técnicas laboratoriais são fáceis de executar e foram padronizadas para determinar a conformidade das estruturas com seu projeto (Dhir et al., 1989; Zhang et al., 2017). Ensaio de permeabilidade no local podem ser usados para obter muita informação. No entanto, isso não sugere a interrupção total das medições laboratoriais, conforme observado no Relatório Técnico da Concrete Society-31 (2008). Fica clara a importância dos ensaios *in loco* para assegurar ao proprietário uma documentação robusta de aceitabilidade da estrutura acabada comparável à documentação requerida para outros aspectos da garantia de qualidade de concreto armado (Bentur e Mitchell, 2008).

Numerosas técnicas têm sido aplicadas para avaliar as propriedades de permeabilidade do concreto normal (NC), mas poucas delas são adequadas para distinguir HPCs. Existem dois desafios técnicos para as técnicas de ensaio atuais: em primeiro lugar, as características da HPC devido à sua estrutura de poros densos e, em segundo lugar, a dificuldade em controlar as condições de ensaio antes e durante as medições. Este artigo revisa as técnicas atuais de ensaio de permeabilidade com o objetivo de identificar um método confiável para os HPCs. O escopo dos métodos de ensaio revisados está restrito a métodos diretos de permeabilidade.

2. MÉTODOS DE ENSAIO E MONITORAMENTO DO DESEMPENHO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

2.1 Métodos de laboratório para avaliar as propriedades de permeabilidade

2.1.1 Métodos de permeabilidade

Os métodos para determinar a permeabilidade do concreto podem ser amplamente divididos em duas categorias, ensaios de permeabilidade ao gás (ar) e ensaios de permeabilidade à água, coeficientes de permeabilidade de gás podem ser determinados medindo o fluxo de gás, quer a uma pressão constante ou através da monitorização da queda de pressão ao longo de um intervalo de tempo especificado (Basheer, 2001). A taxa de vazão é medida para o ensaio de permeabilidade ao gás em estado estacionário. O outro tipo de ensaio de ar, conhecido como ensaio de queda de pressão, usa a queda de pressão para calcular o coeficiente de permeabilidade do gás. Ensaio de permeabilidade ao gás tornaram-se popular por causa da duração curta do ensaio e o efeito limitado as variáveis de ensaio sobre a estrutura de poro ter durante medições (Torrent, 1992, Basheer, 2001; Yang et al, 2013.).

Permeabilidade à água pode ser determinado por medições de fluxo de água de estado qualquer estado estacionário ou não-estacionário, bem como a penetração de água sob a influência de uma carga de pressão externa (Basheer, 1993; Yang et al 2013.). A principal diferença entre eles é a duração do ensaio. O tempo necessário para obter um fluxo constante varia de alguns dias a várias semanas ou meses, dependendo da qualidade do concreto (Hearn e Morley, 1997; El-Dieb e Hooton, 1995), enquanto que a duração do ensaio não-estável é muito mais curta, geralmente menos de 3 dias. O ensaio desenvolvido por El-Dieb e Hooton (1995) precisa ser destacado devido à sua novidade. Em comparação com outros métodos, ele fornece uma ampla faixa de pressão de ensaio de 0,5 MPa a 3,5 MPa e melhora a precisão da medição de vazão. O gama de coeficiente de permeabilidade à água de HPC determinado por Nokken e Hooton (2007) variou de 10-13 a 10-15 m / s, o que está de acordo com os resultados relatados por outros, utilizando um regime de ensaio semelhante (Galle et al., 2004 Reinhardt e Jooss, 2003).

Como os ensaios de estado estacionário requer a duração longa do ensaio para atingir o estado estacionário, a profundidade de penetração da água no concreto também tem sido utilizada para determinar o coeficiente de permeabilidade à água para concretos de baixa permeabilidade. Este método foi padronizado e é descrito pela norma BS-EN 12390-8 (2009). Chia e Zhang (2002) e Desafios e oportunidades para conhecer as propriedades dependentes dos mecanismos de transporte nos concretos de alto desempenho

Pocock e Corrans (2007) verificaram que a dispersão dos resultados é muito elevada e o coeficiente de variação dos resultados do ensaio é superior a 100%. A Tabela 1 apresenta um resumo dos valores típicos e sua variância para diferentes métodos de ensaio.

Tabela 1. Resumo dos valores típicos e variância dos coeficientes de permeabilidade determinados pelos diferentes métodos de ensaio

| Coeficiente de permeabilidade | Concreto | | | Coeficiente de variação |
|-------------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
| | Pobre | Normal | Rico | |
| K_{gs} (m ²) | $>10^{-13}$ | 10^{-14} - 10^{-15} | $<10^{-16}$ | 15%-30% |
| K_{ws} (m/s) | $>10^{-11}$ | 10^{-11} - 10^{-13} | $<10^{-14}$ | 20%-40% |
| K_{wn} (m/s) | $>10^{-10}$ | 10^{-10} - 10^{-12} | $<10^{-13}$ | 40%-100% |

2.1.2 Difusão de íons

O transporte de íons cloreto pode ser avaliado por meio de um ensaio de difusão iônica (Basheer, 2001, Tang et al., 2011). Esses resultados podem ser agrupados em duas categorias; métodos baseados em difusão e baseados em migração. Os ensaios de difusão simulam o movimento de íons cloreto sob a influência de um gradiente de concentração e a configuração tradicional inclui células de difusão (estado estacionário e estado não estacionário) ou imersão / submerso (estado não estacionário). No caso de ensaios em estado estacionário, a taxa de transporte iônico é medida e usando a primeira lei de difusão de Fick, onde coeficiente de difusão é calculado. No caso de ensaios não estacionários, a profundidade de penetração de cloretos é usada para calcular o coeficiente de difusão usando a função de erro da segunda lei de difusão de Fick. O ensaio de difusão em estado estacionário, normalmente, requer seis meses ou mais para atingir um estado estacionário de fluxo. A duração é curta para ensaios de estado não estacionário. Os ensaios de imersão geralmente levam cerca de 91 dias, o que pode ser usado para avaliar a resistência ao cloreto para a maioria dos projetos de construção, se houver tempo disponível.

Desde a década de 1980, muitos métodos têm sido propostos, que aplicam um campo elétrico externo para acelerar a entrada de íons cloreto. Alguns dos ensaios usaram uma alta concentração de solução de fonte de cloreto para acelerar ainda mais o movimento iônico (Tang et al., 2011). Um dos primeiros ensaios nesta categoria é o Ensaio de Permeabilidade Rápida em Cloreto (RCPT) e este foi adotado como um ensaio padrão pela AASHTO T277 (2015) e pela ASTM C1202 (2017). Neste ensaio, a resistência do concreto contra o cloreto é categorizada pela carga total que passa pela amostra durante as primeiras 6 h. Como a carga é realizada por todos os íons e não apenas pelos cloretos, este ensaio tem sido criticado por alguns pesquisadores na década de 1990 (Andrade, 1993, Tang e Nilsson, 1992). O ensaio mais recente é o ensaio de migração em estado estacionário. O arranjo de ensaio é semelhante ao RCPT, no entanto, neste caso, a concentração de cloreto do ânodo é medida em função da carga passante. O coeficiente de migração é calculado usando uma equação de Nernst-Planck modificada (Tang et al., 2011). Tang e Nilsson (1992) propuseram um ensaio rápido baseado na teoria da migração de cloreto no estado estacionário, conhecido como ensaio de migração rápida de cloreto (RCM). O coeficiente de migração de cloreto é calculado a partir da profundidade do cloreto e usando uma equação de Nernst-Planck modificada. Atualmente, este método está incluído nas normas nórdicas NT-Build 492 (1999). Devido a curta duração e simplicidade do ensaio, os três métodos baseados em migração têm uma vantagem sobre os ensaios baseados em difusão para determinar a resistência do concreto ao transporte de cloreto. No entanto, como afirmado anteriormente, o RCPT tem vários problemas inerentes. É relatado que este método mede a condutividade da solução, ao invés de propriedades de transporte de cloreto (Andrade,

1993, Basheer et al., 2005). O aumento da temperatura devido à alta tensão pode afetar significativamente a condutividade dos íons e, portanto, o resultado final em Coulombs. Portanto, o RCPT não pode fornecer uma indicação confiável da migração de cloretos. Os outros dois métodos são baseados na teoria bem estabelecida e amplamente aceita pelos pesquisadores para avaliar os HPCs. Os resultados típicos dos coeficientes de difusão / migração iônica são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resumo dos valores típicos e variância dos coeficientes de difusão / migração de íons determinado por diferentes métodos de ensaio

| Coeficiente de difusão | Concreto | | | Coeficiente de variação |
|------------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
| | Pobre | Normal | Rico | |
| D_{is} (m ² /s) | $>10^{-11}$ | 10^{-11} - 10^{-12} | $<10^{-12}$ | 15%-25% |
| D_{ia} (m ² /s) | $>10^{-11}$ | 10^{-11} - 10^{-12} | $<10^{-13}$ | 20%-35% |
| D_{js} (m ² /s) | $>10^{-11}$ | 10^{-11} - 10^{-12} | $<10^{-13}$ | 20%-35% |
| D_{in} (m ² /s) | $>10^{-11}$ | 10^{-11} - 10^{-12} | $<10^{-13}$ | 20%-35% |

2.1.3 Métodos de Absorção Capilar

Sortividade é o parâmetro para estimar a capacidade de penetração do líquido devido à absorção capilar (Basheer, 2001; McCarter et al., 2009). Dois tipos de ensaios são usados para medir a sortividade: (1) método de ganho de peso; e (2) profundidade de penetração de água. O método de ganho de peso foi aceito como um método padrão europeu: EN-13057 (2002). Basheer (2001) revisou os resultados para NC, que variam de 0,05 e 0,15 mm / min^{0,5}. A profundidade de penetração de água - estimado utilizando uma técnica de divisão da amostra - causada por sucção capilar pode ser utilizada para avaliar também a sortividade (McCarter et al., 1995). No entanto, a necessidade de várias amostras é a principal desvantagem desse método. Também é difícil observar uma clara frente de água para o concreto contendo cinza volante e microssilica. Ganjian e Pouya (2009) estudaram os efeitos de materiais cimentícios complementares (MEC) em sortividade de HPCs e não encontraram nenhuma diferença significativa entre os diferentes HPCs. Resultados semelhantes também foram relatados por outros pesquisadores (Elahi et al., 2010) Assim, a sortividade não é um parâmetro sensível na avaliação do desempenho dos concretos.

2.1.4 Considerações sobre a avaliação das propriedades de permeabilidade dos HPCs por técnicas laboratoriais

Para avaliar as propriedades de permeabilidade dos HPCs usando métodos de ensaios laboratoriais, ensaios de permeabilidade à água e difusão iônica em estado estacionário oferecem um procedimento de análise simples. No entanto, eles têm uma limitação comum, a longa duração do ensaio, que pode levar a interações químicas e físicas acopladas. Os ensaios de estado não estacionário apresentam melhor desempenho neste aspecto e podem ser usados no HPC. Outro ponto que deve ser destacado é a condição inicial de uma amostra, incluindo a quantidade e distribuição da umidade, que tem um efeito predominante nos resultados e deve ser avaliada antes das medições. A Tabela 3 resume os métodos de ensaio laboratoriais e suas equações fundamentais, juntamente com recomendações para avaliar o HPC.

Tabela 3. Resos métodos de ensaio de permeabilidade laboratorial e equações fundamentais

| Mecanismo de transporte | Meio do ensaio | Condição de umidade | Teoria | Equação fundamental | Adequad o para ensaiar HPCs |
|-------------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------------|--|-----------------------------|
| Permeabilidade | Gás | Seco | Estado estacionário | $K_{gs} = \frac{2\mu L P_s Q_s}{A(P_e^2 - P_s^2)}$ | Sim |
| | | | Estado não-estacionário | $K_{gn} = \frac{V_c L}{RTA} \times \ln \frac{P_i}{P_t} / (t_t - t_i)$ | Sim |
| | Água | Saturado | Estado estacionário | $K_{ws} = Q_s / A \times L / \Delta H$ | Não |
| | | | Estado não-estacionário | $K_{wn} = d^2 v / t \Delta H$ | Sim |
| Difusividade e Migração | Gás | Seco | Estado estacionário | $D_g = J_g L / \Delta C$ | Não |
| | | | Estado não-estacionário | $D_c = d_c / t^{0.5}$ | Sim |
| | Vapor | Seco | Estado estacionário | $D_v = J_v L / \Delta C$ | Não |
| | | Saturado | Estado estacionário | | |
| | Difusividade iônica | Saturado | Estado estacionário | $D_{is} = J_s L / \Delta C$ | Não |
| | | | Estado não-estacionário | $C = C_0 [1 - \text{erf}(x / 2\sqrt{D_{ia}t})]$ | Sim |
| | Migração iônica | Saturado | Estado não-estacionário | Classificação da resistência ao cloreto de acordo com a carga total que passa através de uma amostra | Não |
| | | | Estado estacionário | $D_{js} = \frac{J_j}{C_j} \times \frac{RT}{Z_j F} \times L / \Delta E$ | Sim |
| | | | Estado não-estacionário | $D_{in} = \frac{RT}{Z_j F \Delta E} \times (x_d - 1.061x_d^{0.589}) / t$ | Sim |
| | Sortividade (absorção capilar) | Água | Seco | Estado não-estacionário | $S_w = i / t^{0.5}$ |
| Estado não-estacionário | | | | $S_d = d / t^{0.5}$ | Não |

2.2 Métodos de campo

2.2.1 Ensaios de permeabilidade ao ar in loco

Ensaios de permeabilidade ao ar ganharam popularidade devido à sua curta duração de ensaio e ao fato de que a estrutura do concreto não é afetada durante o ensaio. Schonlin e Hilsdorf (1987) desenvolveram um método de ensaio de permeabilidade ao ar montado na superfície que permite medir a queda de pressão para calcular um índice de permeabilidade ao ar. Este método de pressão decrescente é extremamente rápido e pode ser realizado por um único operador. Mais tarde, numerosos pesquisadores modificaram a configuração e a teoria desse método. Uma modificação a ser destacada é o método de Torrent (1992) que introduziu um anel de proteção para desenvolver um aparelho de câmara dupla. Assumindo o fluxo unidirecional de ar através do concreto na câmara interna, o coeficiente de permeabilidade ao ar é calculado a partir da mudança de pressão na câmara interna. Da mesma forma, Guth e Zia (2001) usaram padrões de fluxo através de duas células concêntricas para determinar a permeabilidade ao ar do concreto. A aplicação de um anel de proteção foi proposta para o ensaio de absorção de água in loco. No sentido mais estrito, o anel de proteção não pode garantir o fluxo de ar unidirecional em toda a seção, como a simulação de fluxo realizada por Yang et al. (2015) indicou que o anel de proteção pode confinar o fluxo na superfície mais próxima e que o fluxo unidirecional não atinge toda a profundidade do corpo de prova. No entanto, o método de Torrent pode servir como uma aproximação conservadora da permeabilidade ao ar com as hipóteses simplificadoras. O outro tipo de ensaio de permeabilidade ao ar aplicado na superfície é o ensaio de fluxo de ar na superfície. Whiting e Cady (1992) aplicaram a técnica de vácuo para medir a permeabilidade ao ar in loco, chamada de ensaio de fluxo de ar na superfície (SAF). A taxa de fluxo de ar no estado estacionário sob um nível de vácuo constante é considerada como um indicador de permeabilidade ao ar.

Esse tipo de ensaio de permeabilidade ao ar montado na superfície pode identificar os efeitos da relação a/c, duração de cura e temperatura de cura na permeabilidade sob condições de ensaio controladas. O método Torrent, o dispositivo da Guth-Zia e o Autoclam foram usados para medir a permeabilidade dos HPCs. Romer (2005) relatou que resultados enganosos foram obtidos usando o ensaio de Torrent quando amostras de concreto úmido foram testadas. Resultado semelhante também foi relatado por Guth e Zia (2001) e Elahi et al. (2010). O Autoclam modificado (método de ensaio de baixo volume) foi concebido para medir a permeabilidade ao ar in loco de HPCs (Yang et al., 2015) e na Fig. 1 evidencia o progresso do desenvolvimento de ensaio AutoClam e os resultados típicos para medir a permeabilidade ao ar de 1 CNs e 5 HPCs. A pesquisa confirmou fortes relações positivas entre o método de ensaio proposto e o método de avaliação de permeabilidade padrão existente e forte potencial para se tornarem reconhecidos como métodos internacionais para determinar a permeabilidade de HPCs.

Figg (1973) desenvolveu o ensaio de sucção de furo de perfuração durante o seu trabalho no Building Research Establishment. Uma agulha hipodérmica é empurrada para dentro da cavidade e conectada a um manômetro cheio de mercúrio e a uma bomba de vácuo manual. Após a aplicação do vácuo na cavidade, o tempo necessário para o aumento da pressão do ar de 15 a 20 kN / m² é considerado uma medida da permeabilidade ao ar do concreto. Dois métodos de ensaio também são igualmente encontrados na literatura: desenvolvido por Parrott e Hong (1991) na British Cement Association, e o outro desenvolvido por Dinku e Reinhardt (1997) na Universidade de Stuttgart. Uma questão apontada por Figg (1973) é que as microfissuras são induzidas pela aplicação da broca de ação do martelo e podem afetar os resultados de maneira significativa. Para HPCs, a situação pode se tornar ainda mais severa devido à alta fragilidade e dificuldade de perfuração de concreto de alta resistência (Aitcin, 1998). É evidente, a partir da literatura, que há uma escassez de dados sobre as medidas de permeabilidade ao ar para HPCs.

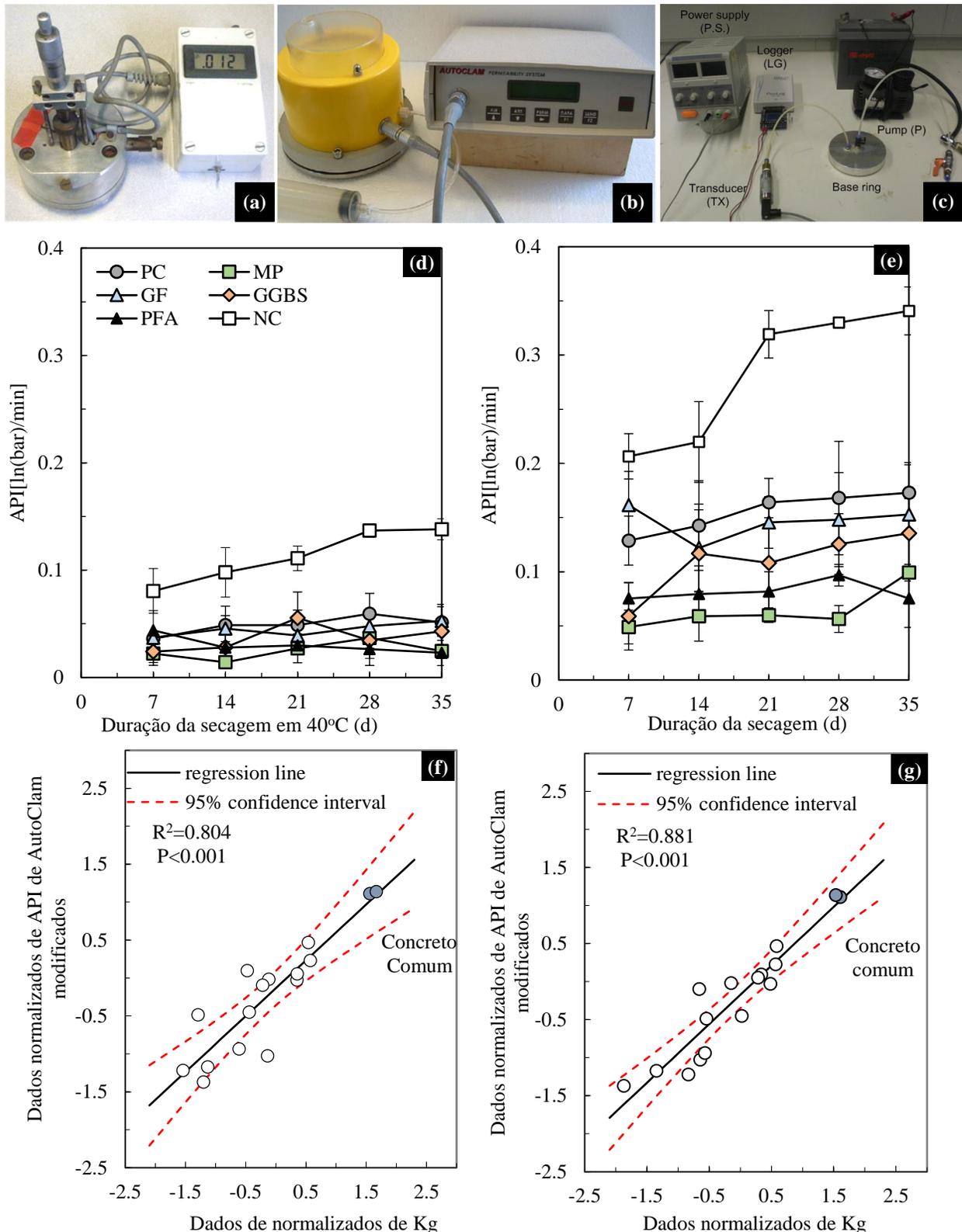


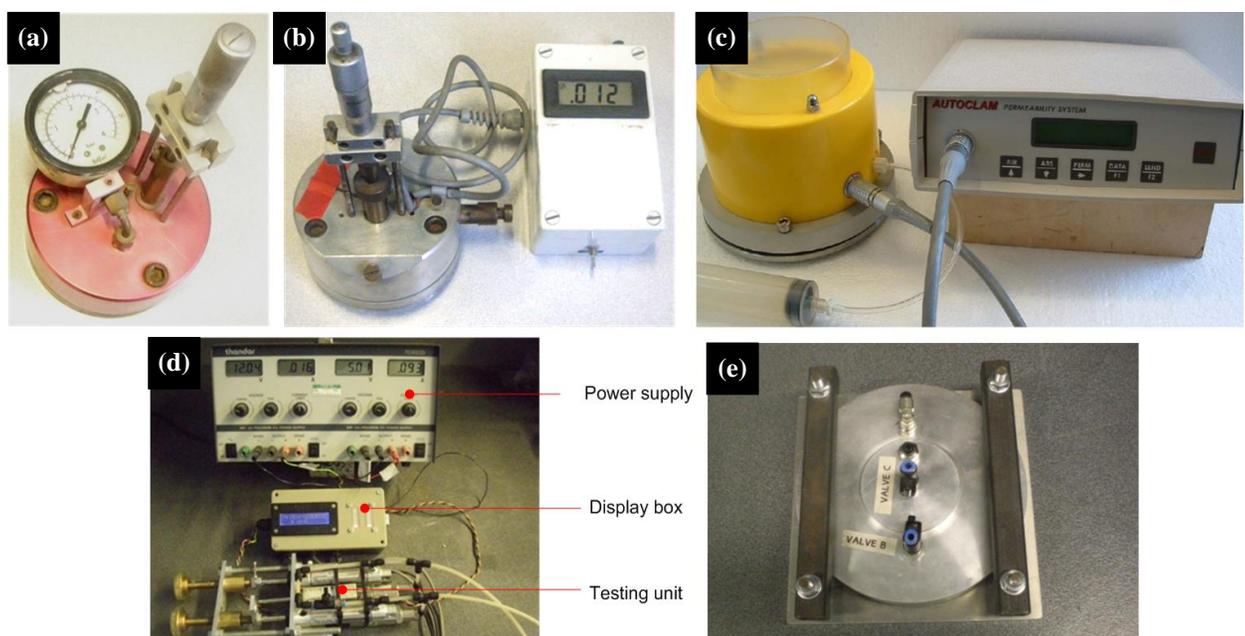
Figura 1. Desenvolvimento do ensaio de permeabilidade ao ar (Autoclam): (a) Ensaio de ar CLAM Universal (1985), (b) Ensaio de ar Autoclam (1992), (c) ensaio de ar Autoclam modificado (2011), (d) resultados do ensaio de ar Autoclam convencional (e) Resultados do ensaio de ar Autoclam modificado, (f) ensaio de ar Autoclam convencional vs ensaio de ar da RILEM

2.2.2 Ensaio de Permeabilidade de Água in loco

Deve-se notar que, para produzir resultados confiáveis, o concreto deve estar com uma umidade equivalente a 21 dias de secagem em estufa a 40°C (Yang et al., 2013). Isso pode ser assegurado pela obtenção de uma umidade relativa inferior a 60% na região próxima da superfície, com aproximadamente 40 mm de espessura (Basheer, 2001; Yang et al., 2013). Essa condição de umidade não é fácil de se obter in loco, especialmente na maior parte do norte da Europa, onde a precipitação anual é de 80 a 110 vezes e a precipitação anual varia de 600 a quase 2000 mm (Perry e Hollis, 2003). Portanto, é lógico que o concreto em estruturas deve ser testado quando se está num estado saturado, em vez de num estado seco e por esse motivo, os ensaios de permeabilidade a água in loco são preferíveis para ensaios de permeabilidade de ar para a avaliação da qualidade de concreto nestas regiões.

O primeiro ensaio padronizado teve como objetivo medir a absorção de campo do ensaio de absorção de superfície inicial (ISAT) na BS: 1881-208 (1996): Ensaio de concreto - Recomendações para a determinação da absorção inicial de superfície do concreto. A absorção de superfície inicial é definida como a taxa de fluxo de água em concreto por unidade de área sob uma pressão constante. O Autoclam usa o mesmo procedimento de ensaio e pode medir tanto a absorção de água quanto a sorvidade do concreto (Basheer et al., 1994). Figg (1973) e Dhir et al. (1989) desenvolveram métodos de perfuração que são capazes de realizar medições de absorção de água, mas não é apropriado estimar a sorvidade usando métodos intrusivos, já que o processo de absorção de água capilar é feito a partir do furo, e não da superfície. O ISAT pode ser usado para estudar a sorvidade do concreto, enquanto o Autoclam é uma maneira direta, fácil e rápida de determinar essa propriedade. Conforme discutido na seção 1, no entanto, a sorvidade não é um parâmetro para os HPCs.

O ensaio Clam, primeiramente relatado por Montgomery e Adams (1985), para medir a permeabilidade à água do concreto in loco foi modificado por Basheer et al. (1994), que está atualmente disponível como o Sistema de Permeabilidade Autoclam (Figura 2). É um ensaio de permeabilidade de superfície e a permeabilidade à água é estimada pela teoria de fluxo em estado estacionário ou não estacionário. Na última versão, uma pressão de ensaio de 7 bar pode ser selecionada para avaliar os HPCs e melhorar a repetitividade e a precisão das medições (Yang et al., 2015), cujos resultados são dados na Fig. 2.



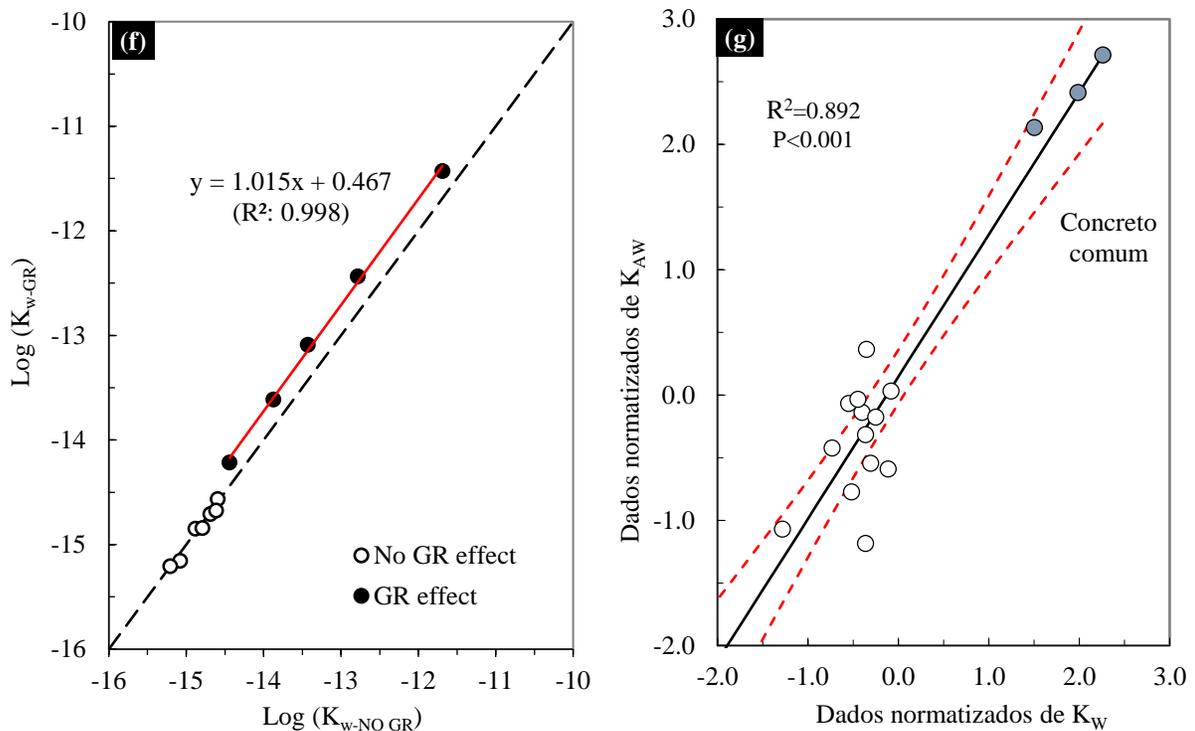


Figura 2. Desenvolvimento dos ensaios de permeabilidade à água CLAM (a) ensaio CLAM (1985), (b) ensaio CLAM Universal (1989), (c) Ensaio Autoclam (1992), (d) Ensaio de água CLAM de alta pressão (2012), (e) célula de ensaio com o anel de segurança, (f) relação entre o coeficiente de permeabilidade dos ensaios com e sem o anel de segurança, (g) ensaio de água CLAM de alta pressão (K_{AW}) Vs BS-EN ensaio de penetração de água (K_W)

Um ensaio de permeabilidade de campo (FPT) desenvolvido por Meletiou et al. (1992) usa um procedimento de permeabilidade à água em estado estacionário e para remover a influência da umidade nos resultados do ensaio, a saturação a vácuo é aplicada antes das medições. O fluxo de água é monitorado pelo nível de água no tubo do manômetro. Presume-se que o fluxo estabilize após 2 horas e a taxa de fluxo em regime permanente é usada para calcular o coeficiente de permeabilidade. Os resultados indicam que o efeito das variações de umidade é quase removido após a aplicação da saturação a vácuo, embora a potencial influência adicional de microfissuras não seja totalmente abordada.

2.2.3 Ensaios de migração in loco

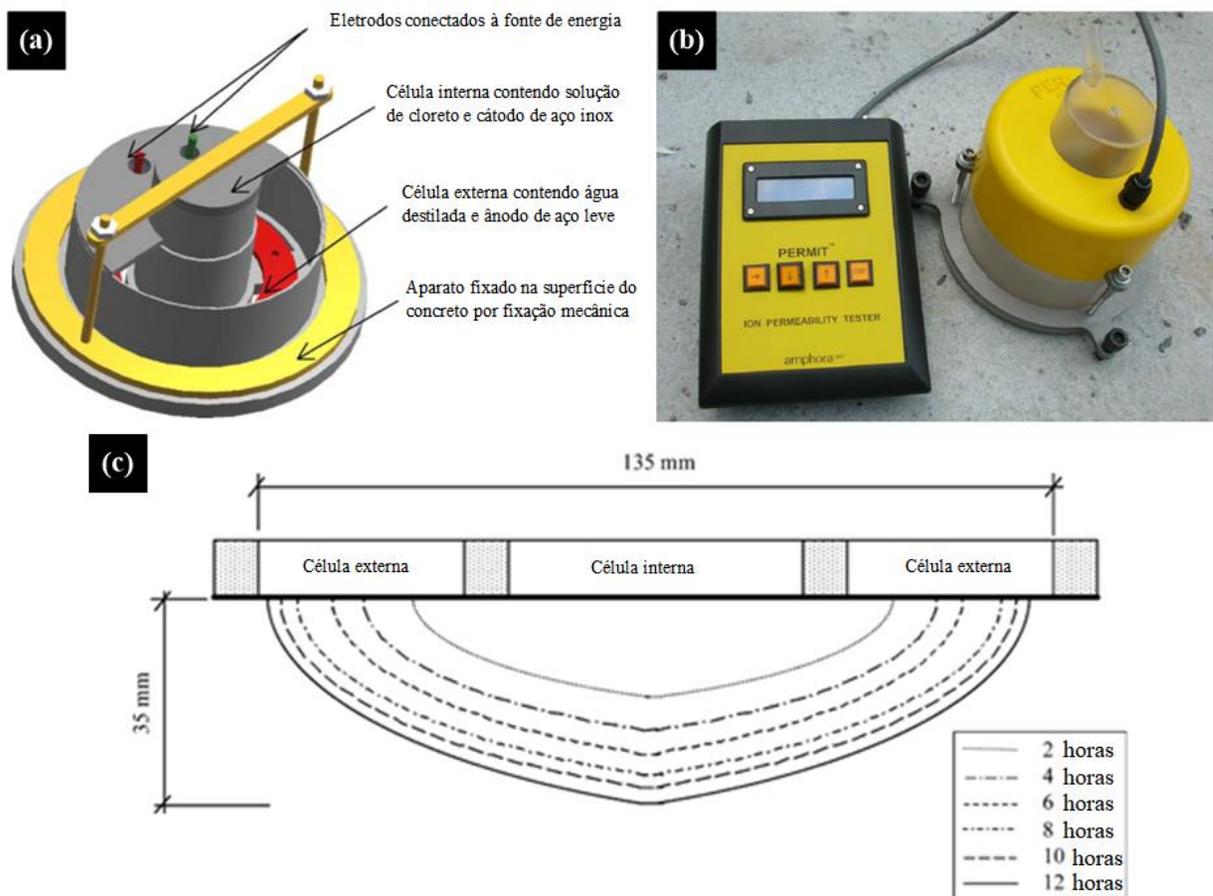
Ensaios de difusão em estado estacionário não são adequados para aplicação in loco devido à longa duração do ensaio. Um campo elétrico externo pode acelerar o transporte iônico e, como consequência, alguns ensaios de migração foram projetados como técnicas de ensaio de campo. Tais métodos incluem o ensaio de Coulomb desenvolvido por Whiting (1981), o ensaio rápido de migração de cloreto in loco (ensaio RCM) (Tang et al., 2011) e o ensaio de migração de íons PERMIT (Nanukuttan et al., 2015).

Whiting (1981) desenvolveu o ensaio de Coulomb com base no método RCPT. A carga passante é considerada como um índice para avaliar a difusividade do concreto. Como discutido anteriormente, o ensaio de Coulomb fornece uma estimativa da carga realizada por todos os íons e não apenas pelos cloretos. Além disso, esta técnica não fornece um coeficiente de migração. O segundo método de campo foi desenvolvido por Tang e Nilsson (Tang et al., 2011) e baseado no ensaio de migração rápida de cloreto (RCM). Um potencial externo é aplicado através da armadura e catodo na câmara. Após a medição, um testemunho é retirado da posição de ensaio e a frente de penetração de cloretos é examinada pela técnica colorimétrica. Como os testemunhos são

Desafios e oportunidades para conhecer as propriedades dependentes dos mecanismos de transporte nos concretos de alto desempenho

necessários para a interpretação do método RCM in loco, não há vantagem óbvia em comparação com os métodos laboratoriais.

O ensaio de migração iônica PERMIT (Figura 3) foi desenvolvido por Nanukuttan et al. (2009). Tanto o anodo quanto as câmaras catódicas estão na forma de reservatórios cilíndricos concêntricos. Os íons cloreto se movem do cátodo em direção ao anodo através do concreto influenciado pela diferença de potencial criada pelo campo elétrico externo. A mudança na condutividade do anodo é usada como um meio de monitorar o movimento do cloreto. O coeficiente de migração in loco é avaliado usando uma equação de Nernst-Planck modificada. A validação da autorização foi efetuada por comparação dos coeficientes de ensaio PERMIT contra o ensaio unidimensional de migração de cloreto, o coeficiente de difusão eficaz do ensaio de difusão padrão e o coeficiente de difusão aparente determinado a partir de perfis de cloretos (Basheer et al., 2005; Nanukuttan et al. 2015). Os resultados mostram que, para um vasto gama de misturas de concreto, um elevado grau de correlação existente entre o in loco ensaio de migração e os ensaios de laboratório, cujos resultados são apresentados na Figura 3. Note-se que o desempenho do PERMIT é confirmado em laboratório e para o local de aplicação, como a área de ensaio é saturada por um período de 24 horas, não é possível obter saturação completa da superfície até 30 mm, especialmente para HPCs. Portanto, o ensaio PERMIT precisa ser validado por sua capacidade de avaliar os HPCs in loco.



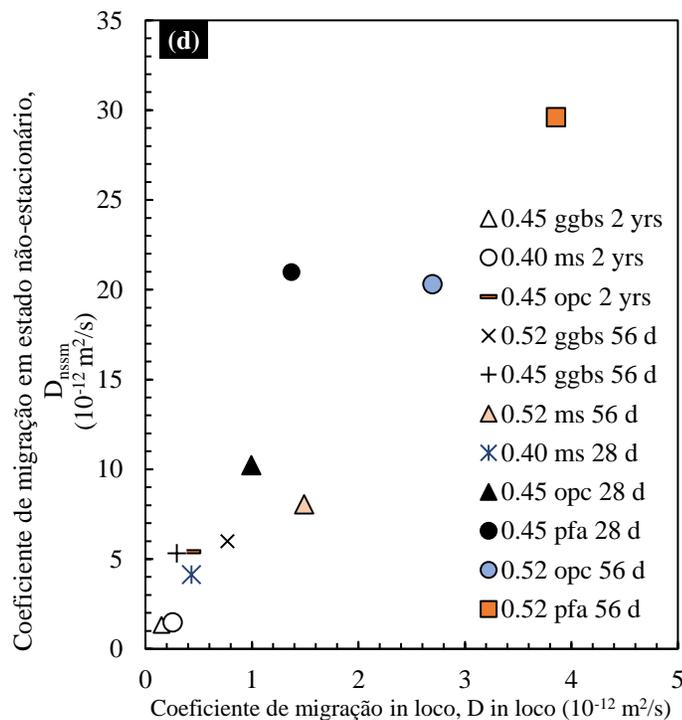


Figura 3. Desenvolvimento do ensaio PERMIT (a) esquemática do ensaio PERMIT, (b) o aparelho de ensaio de migração iônica PERMIT (2005), (c) área de fluxo de cloreto em diferentes tempos de ensaio, (d) PERMIT Vs ensaio de migração não-estacionário

As técnicas comercialmente disponíveis são agrupadas em ensaios de permeabilidade, ensaios de difusão e sorvidade (absorção de água), semelhantes aos métodos laboratoriais, cujas principais características estão resumidas na Tabela 4.

Tabela 4 Resumo do método de ensaio in loco para avaliar as propriedades de permeabilidade do concreto

| Nome | Meio de penetração | Abordagem para controlar o efeito de umidade | Parâmetros determinados | Confiança | Custo por ensaio | Métodos montados em superfície ou intrusivos |
|---------------------|--------------------|--|------------------------------------|-----------|---------------------|--|
| Schonlin e Hilsdorf | Ar | Uso de uma pistola de calor para remover a umidade | Queda de pressão | Boa | Baixo | Montado na superfície |
| Torrent | Ar | Medida da Resistividade | Queda de pressão | Boa | Relativamente baixo | Montado na superfície |
| Guth e Zia | Ar | Nenhuma exigência | Queda de pressão | Fraca | Baixo | Montado na superfície |
| SAF | Ar | Nenhuma exigência | Taxa de vazão | Boa | Alto | Montado na superfície |
| Autoclavagem | Água, Ar | RH exigido | Queda de pressão ou volume de água | Boa | Relativamente baixo | Montado na superfície |

| | | | | | | |
|--------------------|----------|---|-------------------------|-------|----------------------|-----------------------|
| LV Autoclam | Ar | RH exigido | Queda de pressão | Boa | Baixo | Montado na superfície |
| Figg | Água, Ar | Nenhuma exigência | Queda de pressão | Boa | Baixo | Método intrusivo |
| Parrot | Ar | RH medida | Queda de pressão | Boa | Relativa mente baixo | Método intrusivo |
| Dinku e Reinhardt | Ar | Uso de alta pressão | Queda de pressão | Boa | Relativa mente baixo | Método intrusivo |
| Dhir | Ar | Uso de vácuo para remover a umidade | Queda de pressão | Boa | Baixo | Montado na superfície |
| CLAM | Água | imersão por 24 horas | volume de água | Boa | Relativa mente baixo | Montado na superfície |
| Alta pressão CLAM | Água | Saturação de vácuo | volume de água | Boa | Relativa mente baixo | Montado na superfície |
| GWT | Água | RH medida | Taxa de vazão | Fraca | Relativa mente baixo | Montado na superfície |
| ISAT | Água | Superfície de ensaio protegida da água por pelo menos 48h | volume de água | Fraca | Baixo | Montado na superfície |
| FPT | Água | Saturação de vácuo | Taxa de vazão | Boa | Alto | Método intrusivo |
| CAT | Água | Nenhuma exigência | volume de água | Fraca | Relativa mente baixo | Método intrusivo |
| PERMIT | Ion | imersão por 24 horas | Condutividade | Boa | Relativa mente baixo | Montado na superfície |
| <i>In loco</i> RCM | Ion | Nenhuma exigência | Espessura de penetração | Fraca | Alto | Montado na superfície |
| Coulomb test | Ion | Saturação de vácuo | Coulomb | Fraca | Relativa mente baixo | Montado na superfície |

Nota: Alguns métodos de ensaio *in loco* não estão incluídos nesta tabela porque não há informações suficientes.

2.2.4 Recomendação de métodos de permeabilidade *in loco* no contexto da avaliação de HPCs

Duas questões sempre surgem para o ensaio *in loco*. Uma é se ele pode fornecer a informação que é realmente necessária, uma objeção óbvia é que a maioria das técnicas mede algo relacionado às propriedades de transporte, exceto as características de permeabilidade intrínseca. O outro diz respeito à capacidade dessas técnicas para testar novos materiais cimentícios. Devido à diferença na microestrutura entre NC e HPCs, as características de desempenho do equipamento de ensaio

precisam ser cuidadosamente examinadas e validadas. Com relação aos métodos de permeabilidade discutidos acima, alguns pontos estão brevemente destacados abaixo:

- 1) O método de perfuração é um método parcialmente destrutivo, pois os reparos são inevitáveis após a realização das medições. Mais importante ainda, a ação de percussão da broca de perfuração usada para perfurar o furo pode criar um dano prejudicial e incontrolável do concreto nas proximidades do furo. Isso pode causar discrepâncias nos resultados do ensaio. Como tal, este tipo de método não é recomendado. O método montado na superfície pode superar as desvantagens acima. O fluxo da maioria dos métodos baseados na superfície é axi-simétrico, não unidirecional. Isso significa que a análise de fluxo multidimensional é necessária para examinar os resultados do ensaio.
- 2) As diferenças na permeabilidade dos HPCs são muito menores e isso desafia a maioria dos aparatos de ensaio in loco para diferenciá-los. Os ensaios de queda de pressão e de pressão constante são possíveis para caracterizar HPCs. O primeiro exige que a geometria do reservatório seja conhecida e registre a diminuição da pressão dentro do reservatório, enquanto o segundo precisa do conhecimento dos ensaios de geometria, vazão e pressão. O ensaio de água de alta pressão e o ensaio de ar modificado são projetados com base nesses conceitos para medir a permeabilidade de HPCs.
- 3) O sucesso das avaliações de campo é grandemente influenciado pelo teor de água e pelos gradientes de umidade no concreto. A importância da condição inicial antes das medições deve ser destacada. Amostras "secas" ou "saturadas" são preferidas para medir as propriedades de transporte. Além disso, a presença de fissuras e heterogeneidade no concreto também pode afetar significativamente as taxas de fluxo.
- 4) A maioria dos trabalhos concentra-se nos ensaios de permeabilidade in loco, enquanto apenas três ensaios de migração iônica foram testados para aplicação em campo. Mais esforços devem ser dados na investigação laboratorial para melhorar totalmente a eficácia desses métodos para aplicação em campo, pois os ensaios de migração de íons são capazes de avaliar a qualidade do cobrimento superficial até 30 mm.

3. CONCLUSÕES

Se o ensaio foi realizado mais cedo no processo de construção, então possíveis problemas podem ter sido identificados e medidas apropriadas tomadas no início da vida das estruturas. Os métodos de ensaio de permeabilidade in loco e de laboratório mostram potencial para avaliar o desempenho de durabilidade de HPCs. Embora testemunhos obtidos a partir de estruturas em serviço poderiam ser testados em laboratório sob condições de temperatura e umidade controladas, ensaios confiáveis de permeabilidade in loco têm a vantagem de realizar diversos ensaios no mesmo local de ensaio sem danificar a estrutura. Esses métodos de ensaio podem formar a base do desenvolvimento de uma estratégia de especificação baseada em desempenho para estruturas de concreto, mas eles têm seus próprios benefícios específicos e também desvantagens. Além disso, vários aspectos interessantes não foram totalmente abordados em estudos anteriores, ou seja, a influência da deterioração e do carregamento, a influência da fissuração, a relação entre a microestrutura e as propriedades de permeabilidade, adequação dos métodos de ensaio de permeabilidade convencionais para avaliar novos materiais cimentícios multifuncionais. Portanto, mais pesquisas são necessárias para esclarecer esses fatores. O conhecimento e técnicas estabelecidos para avaliar o desempenho de concretos de cimento Portland normais é uma área que requer desenvolvimento, se eles forem usados na avaliação do desempenho de HPCs.

4. AGRADECIMENTOS

Este artigo foi preparado com base em pesquisas realizadas pelos autores junto com seus colegas e alunos. Não foi possível listar todos os contribuintes como autores, mas a sua contribuição nas discussões e contribuições para o conteúdo deste documento é reconhecido com gratidão. O financiamento para o trabalho foi recebido de uma variedade de fontes, incluindo o Conselho de Pesquisa de Engenharia e Ciências Físicas, o Conselho de Estratégia de Tecnologia e a Fundação Nacional de Ciência da China.

5. REFERÊNCIAS

- Aitcin, P. C. (1998), *High performance concrete*. Spon Press.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (2015,) *AASHTO T-277, Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, 15 pages.
- Andrade, C. (1993), *Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements*, *Cement and Concrete Research*, vol 23, 724-742. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90023-3)
- ASTM C-1202(a) (2017), *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, ASTM, 8 pages.
- Basheer, P. A. M. (1993), *A brief review of methods for measuring the permeation properties of concrete in-situ*, *Structures and Buildings, Proceedings of the ICE*, vol 99, 74-83. <https://doi.org/10.1680/istbu.1993.22515>
- Basheer, P. A. M., Long, A. E. and Montgomery, F. R. (1994), *The Autoclam - a new test for permeability*, *Concrete*, vol 28, 27-29.
- Basheer, P. A. M. (2001), *Permeation analysis, in Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology: Principles, Techniques and Applications*, Editors V.S. Ramachandran and J. J. Beaudoin, Noyes Publications. 658-727.
- Basheer, P. A. M., Andrew, R. J., Robinson, D., Long, A. E. (2005), *'PERMIT' ion migration test for measuring the chloride ion transport of concrete on site*, *NDT & E International*, vol 38, 219-229. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.06.013>
- Basheer, L., Cleland, D. J. and Basheer, P. A. M. (2008), *Autoclam Permeability System to assess the protection provided by surface treatments*. In: JIN W.-L., UEDA T. & BASHEER P.A.M., eds. *Advances in Concrete Structural Durability, Proceedings of the International Conference on Durability of Concrete Structures*, 26-27 November Zhejiang University, Hangzhou, China. Zhejiang University Press, 1186-1192.
- Bentur, A. and Mitchell, D. (2008), *Materials performance lessons*, *Cement Concrete Research*, vol 38, 259-272. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.009>
- Beushausen, H. and Luco, L. F. (2016), *Performance-based specifications and control of concrete durability*, RILEM TC 230-PSC State-of-the-Art report, 373 pages.
- BS 1881-208 (1996), *Testing concrete. Recommendations for the determination of the initial surface absorption of concrete*, BSI, 14 pages.
- BS-EN 12390-8 (2009), *Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure*, BSI, 10 pages.
- BS-EN 13057 (2002), *Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of resistance of capillary absorption*, BSI, 16 pages.
- Chia, K. S. and Zhang, M. H. (2002), *Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete*. *Cement and Concrete Research*, vol 32, 639-645. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00738-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00738-4)
- Concrete Society Technical Report: No. 31, *Permeability testing of site concrete*. 2008, 90 pages.

- Dhir, R. K., Hewlett, P. C., Chan, Y. N. (1989), *Near-surface characteristics of concrete prediction of carbonation resistance*. Magazine of Concrete Research, vol 41, 137-43. <https://doi.org/10.1680/mac.1989.41.148.137>
- Dinku, A. and Reinhardt, H. (1997), *Gas permeability coefficient of cover concrete as a performance control*. Materials and Structures. 30: 387-393. <https://doi.org/10.1007/BF02498560>
- Elahi, A., Basheer, P. A. M., Nanukuttan, S. V. and Khan, Q. U. Z. (2010), *Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials*. Construction and Building Materials, vol 24, 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.045>
- El-Dieb, A. E. and Hooton, R. D. (1995), *Water permeability measurement of high performance concrete using a high pressure triaxial cell*. Cement and Concrete Research, vol 25, 1199-1208. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00112-P](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00112-P)
- Figg, J. W. (1973), *Methods of measuring the air and water permeability of concrete*. Magazine of Concrete Research, 25: 213-219. <https://doi.org/10.1680/mac.1973.25.85.213>
- Galle, C., Peycelon, H. and Bescop, P. L. (2004), *Effect of an accelerated chemical degradation on water permeability and pore structure of cement-based materials*. Advances in Cement Research, vol 16, 105-114. <https://doi.org/10.1680/adcr.2004.16.3.105>
- Guth, D. L. and Zia, P. (2001), *Evaluation of New Air Permeability Test Device for Concrete*. ACI Materials Journal, vol 98: p. 44-51.
- Ganjian, E. and Pouya, H. S. (2009), *The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag*. Construction and Building Materials, vol 23(2): p. 644-652. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.009>
- Hearn, N. and Morley, C. T. (1997), *Self-sealing property of concrete—Experimental evidence*. Materials and Structures, vol 30, 404-411. <https://doi.org/10.1007/BF02498563>
- McCarter, W. J., Emerson, M. and Ezirim, H. (1995), *Properties of concrete in the cover zone: developments in monitoring techniques*, Magazine of Concrete Research, vol 47, 243-251. <https://doi.org/10.1680/mac.1995.47.172.243>
- McCarter, W. J., Starrs, G., Kandasami, S., Jones, M. R. and Chrisp, M. (2009), *Electrode configurations for resistivity measurements on concrete*, ACI Materials Journal, vol 106, 258-264.
- McCarter, W. J., Suryanto, B., Taha, H. M., Nanukuttan, S. and Basheer, P. A. M. (2017), *A Testing Methodology for Performance-Based Specification*, Journal of Structural Integrity and Maintenance, vol 2, 78-88.
- Meletioui, C. A., Tia, M. and Bloomquist, D. (1992), *Development of a field permeability test apparatus and method for concrete*. ACI Materials Journal. 89: 83-89.
- Montgomery, F. R. and Adams, A. E. (1985), *Early experience with a new concrete permeability apparatus*, Proceeding of Structural Faults, ICE London, 359-363.
- Nanukuttan, S. V., Basheer, P. A. M., McCarter, W. J., Tang, L., Holmes, N., Chrisp, T. M., Starrs, G. and Magee, B. (2015), *The performance of concrete exposed to marine environments: predictive modelling and use of laboratory/on site test methods*, Construction and Building Materials, vol 93, pp. 831-840.
- Nokken, M. R. and Hooton, R. D. (2007), *Using pore parameters to estimate permeability or conductivity of concrete*. Materials and Structures, vol 41, 1-16. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9212-y>
- NT Build-492 (1999), *Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*, Nordtest method, 8 pages.
- Parrott, L. J. and Hong, C. Z. (1991), *Some factors influencing air permeation measurements in cover concrete*. Materials and Structures. vol 24: 403-408. <https://doi.org/10.1007/BF02472013>
- Perry, M. and Hollis, D. (2003), *The generation of monthly gridded datasets for a range of climatic variables over the United Kingdom*. Met Office.

- Pocock, D. and Corrans, J. (2007), *Concrete durability testing in Middle East construction*. Concrete Engineering International, 52-54.
- Reinhardt, H. and Jooss, M. (2003), *Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width*. Cement and Concrete Research, vol 33, 981-985. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01099-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01099-2)
- Romer, M. (2005), *Effect of moisture and concrete composition on the Torrent permeability measurement*. Materials and Structures, vol 38 (279): 541-547. <https://doi.org/10.1007/BF02479545>
- Schonlin, K. and Hilsdorf, H. K. (1987), *Evaluation of the effectiveness of curing of concrete structures*, in Concrete Durability: Katharine and Bryant Mather International Conference, Scanlon J. M. (Editor). ACI, 207-226.
- Tang, L. and Nilsson, L. O. (1992), *Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electric field*. ACI Materials Journal, vol 89, 49-53.
- Tang, L., Nilsson, L. O. and Basheer, P. A. M. (2011), *Resistance of Concrete to Chloride Ingress: Testing and modelling*. Spon Press.
- Torrent, R. T. (1992), *A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site*. Materials and Structures, vol 25, 358-365. <https://doi.org/10.1007/BF02472595>
- Whiting, D. (1981), *Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete*. in FHWA/RD-81/119. Federal Highway Administration. 173 pages.
- Whiting, D. and Cady, P. D. (1992), *Condition Evaluation of Concrete Bridges Relative to Reinforcement Corrosion*. Strategic Highway Research Program: Washington, D.C. 93 pages.
- Yang, K., Basheer, P. A. M., Magee, B. and Bai, Y. (2013), *Investigation of moisture condition and Autoclam sensitivity on air permeability measurements for both normal concrete and high performance concrete*, Construction and Building Materials, vol 48, 316-331. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.087>
- Yang, K., Basheer, P. A. M., Magee, B., Bai, Y. and Long, A. E. (2015), *Repeatability and Reliability of New Air and Water Permeability Tests for Assessing the Durability of High-Performance Concretes*, Journal of Materials in Civil Engineering, vol 27, 11 pages. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001262](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001262)
- Yang, K., Basheer, P. A. M., Bai, Y., Magee, B. and Long, A. E. (2015), *Assessment of the effectiveness of the guard ring in obtaining a uni-directional flow in an in situ water permeability test*, Materials and Structures, vol 48, 167–183. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0175-5>
- Zhang, P., Wittmann, F. H., Vogel, M., Müller, H. S. and Zhao, T. J. (2017), *Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete*, Cement and Concrete Research, vol 100, 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.018>