

Limitações da taxa de absorção capilar e da permeabilidade à água para a estimativa da taxa de penetração de cloreto em concreto em relação ao projeto prescritivo para durabilidade em ambiente marinho

Y. A. Villagrán Zaccardi^{1, 2} * , M. E. Sosa¹ , Á. A. Di Maio¹ 

* Autor de Contato: yuryvillagran@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.302>

Recepção: 13/03/2018 | Aceitação: 18/07/2018 | Publicação: 31/08/2018

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise de dados experimentais de concreto convencional em relação à velocidade de absorção capilar e à penetração de água sob pressão para comparar estes parâmetros com a velocidade de difusão de cloretos determinada no laboratório e no ambiente marinho real. Os requisitos para a garantia da durabilidade das estruturas de concreto armado baseiam-se na caracterização qualitativa das propriedades de transporte. Para o caso específico do meio marinho, é necessário avaliar a resistência do concreto à penetração de cloreto. Os resultados mostram as limitações de ambos parâmetros como índices prescritivos, com a velocidade de absorção capilar apresentando algumas vantagens sobre a penetração de água sob pressão.

Palavras-chave: absorção capilar; penetração de água; cloreto; durabilidade; desenho prescritivo.

Citar como: Y. A. Villagrán Zaccardi, M. E. Sosa, Á. A. Di Maio (2018), “Limitações da taxa de absorção capilar e da permeabilidade à água para a estimativa da taxa de penetração de cloreto em concreto em relação ao projeto prescritivo para durabilidade em ambiente marinho”, Revista ALCONPAT, 8 (3), pp. 301-316, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.302>

¹ LEMIT - Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica - 52 entre 121 y 122 - 1900 - La Plata - Provincia de Buenos Aires

² CONICET - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Godoy Cruz 2290, Buenos Aires.

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, Mérida, 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.

Limitations of sorptivity and water permeability for the estimation of the chloride penetration rate in concrete regarding the accomplishment of prescriptive design for durability in the marine environment

ABSTRACT

This paper presents an analysis of experimental data from conventional concrete regarding sorptivity and penetrability under pressure comparing these parameters to chloride diffusion rate determined in the laboratory and in actual marine environment. Prescriptions for durability assurance of reinforced concrete structures is based on the qualitative characterization of transport properties. For the specific case of the marine environment, it is required to assess the resistance of concrete to chloride ingress. The results show the limitations of both parameters as prescriptive indexes, with capillary absorption rate showing some advantages over water penetration under pressure.

Keywords: capillary absorption; water penetration; chloride; durability; prescriptive design.

Limitaciones de la velocidad de absorción capilar y la permeabilidad al agua para la estimación de la velocidad de penetración de cloruro en hormigón respecto a la consecución del diseño prescriptivo para durabilidad en ambiente marino.

RESUMEN

Este artículo presenta un análisis de datos experimentales de hormigón convencional respecto a la velocidad de absorción capilar y la penetración de agua a presión comparando estos parámetros con la velocidad de difusión de cloruro determinada en el laboratorio y en ambiente marino real. Las prescripciones para el aseguramiento de la durabilidad de estructuras de hormigón armado están basadas en la caracterización cualitativa de las propiedades de transporte. Para el caso específico del ambiente marino, se requiere evaluar la resistencia del hormigón al ingreso de cloruro. Los resultados muestran las limitaciones de ambos parámetros como índices prescriptivos, con la velocidad de absorción capilar mostrando algunas ventajas sobre la penetración del agua bajo presión.

Palabras clave: absorción capilar; penetración de agua; cloruro; durabilidad; diseño prescriptivo.

1. INTRODUÇÃO

A maioria dos mecanismos de deterioração do concreto está relacionada ao desempenho da camada de cobertura. Esta é responsável pela durabilidade da estrutura ao ponto de fornecer proteção física e química à armadura contra substâncias agressivas externas. Os métodos de projeto para durabilidade visam características do concreto para avaliar uma certa vida útil.

A vida útil de uma estrutura referente à degradação de seus constituintes pode ser explicada pela aplicação do modelo proposto por Tuutti (Tuutti, 1982). A vida útil estipulada é o período durante o qual os requisitos de serviço devem ser atendidos, com um nível acima do mínimo aceitável em termos de segurança, conforto e estética. Para isso, as condições de exposição às quais a estrutura será exposta devem ser consideradas. Em geral, as normas consideram períodos de vida útil estipulados de 50 ou 100 anos, desde que a fissuração seja controlada e que o concreto seja lançado, compactado e curado adequadamente.

Requisitos mínimos para as propriedades e profundidade do revestimento são definidos. Essa abordagem prescritiva é amplamente aceita, mas é limitada em relação à precisão da vida útil projetada (Rostam, 2000). A classificação geral de ambientes e parâmetros alvo impedem

Limitações da taxa de absorção capilar e da permeabilidade à água para a estimativa da taxa de penetração de cloruro em concreto em relação ao projeto prescriptivo para durabilidade em ambiente marinho

considerar todos os fatores intervenientes. Esses parâmetros são muitas vezes restritos qualitativamente, ou uma quantificação indeterminada é estabelecida para eles (Anoop et al., 2002), e a vida útil real não pode ser estimada com precisão. A corrosão da armadura é um dos processos de deterioração mais investigados para a durabilidade de estruturas de concreto armado.

O modelo de Tuutti divide o processo de corrosão em dois períodos de desenvolvimento que cobrem o período de vida útil (Tuutti, 1982): iniciação e propagação. Durante o período de iniciação, a disposição das condições necessárias para o início da degradação se desenvolve. Durante o período de propagação, a situação piora progressivamente com um nível de desempenho inferior ao momento em que o grau de deterioração da estrutura é tal que não cumpre as condições mínimas de serviço exigidas. Em geral, o tempo requerido para a despassivação da armadura é concebido como o período de iniciação, enquanto que a fissuração e deslocamento ocorrem dentro do período de propagação (Tuutti, 1982; DURAR, 1997; Rostam, 2000).

Os fatores que influenciam o período de iniciação no ambiente marinho são classificados em interno e externo. Fatores internos estão relacionados principalmente às características do concreto do revestimento. Entre esses fatores, os mais importantes são aqueles que determinam a resistência do material ao ingresso de cloreto: porosidade da matriz (Collepari et al. 1970; Monosi et al. 1989) (determinado pela relação água/aglomerante, grau de compactação, cura) e tipo de cimento (Collepari et al., 1970; Glass e Buenfeld, 2000), porosidade da zona de transição interfacial (Delagrave et al., 1997a) e porosidade do agregado (Fernández Luco, 2001).

A agressividade do ambiente define fatores externos (Sandberg et al., 1998; Traversa, 2001; Andrade et al., 2002; Traversa e Di Maio, 2002; Di Maio et al. 2004), caracterizados pela temperatura média e umidade relativa, incidência de ventos, chuva, distância e altura em relação ao nível do mar. Finalmente, a presença de camadas superficiais de proteção na estrutura (pintura ou acabamento) deve ser considerada, pois reduz o nível de exposição (Di Maio et al., 2000). Todos esses fatores determinam o tempo necessário para que os cloretos atinjam o aço.

O ingresso de cloreto em concreto armado leva à corrosão por pites da armadura. Quando o teor limite de cloreto na superfície da armadura é alcançado, o aço se despassiva e começa a corroer se o oxigênio e a umidade estiverem disponíveis. Portanto, o revestimento deve evitar essa situação o maior tempo possível. Suas propriedades de transporte definem o tempo necessário para iniciar a corrosão. Menor taxa de transporte de cloretos através do concreto de revestimento permitirá uma vida útil mais longa da estrutura.

A resistência do revestimento ao ingresso de cloreto é geralmente definida pelo coeficiente de difusão aparente (Collepari et al., 1970), D_{ap} , que estabelece a maior ou menor taxa na qual os íons entram em concreto. O projeto baseado em desempenho aplica esse coeficiente para calcular uma determinada vida útil da estrutura para certa profundidade de revestimento. No entanto, o D_{ap} geralmente não é incluído explicitamente na regulamentação de construção como um parâmetro de projeto para o concreto, pois sua medição é muito demorada.

Permanecem algumas incertezas com relação à aplicação de coeficientes de difusão para previsão da vida útil, pois é muito difícil simular condições reais de exposição em ensaios de curto prazo, particularmente para considerar a dependência da difusividade aparente na concentração superficial de cloreto (Andrade et al. 2000). Em consequência, os engenheiros de projeto mostram relutância em usar modelos complexos para a previsão do ingresso de cloreto no concreto, e são pouco propensos a introduzi-los em códigos ou normas (Andrade et al., 2013).

Em vez disso, a correlação entre a difusividade de cloreto com outras propriedades do concreto é frequentemente considerada para o projeto. Essa abordagem é a base para o projeto prescritivo.

Critérios prescritivos são basicamente valores máximos ou mínimos para diferentes propriedades concretas a serem satisfeitas. Essas propriedades podem incluir resistência do concreto, relação água / aglomerante, absorção de água, taxa de absorção capilar, penetração de água sob pressão, teor e tipo de cimento. Todos esses fatores são relatados como os principais parâmetros de controle da durabilidade e, com base nisso, os limites são estabelecidos a partir de valores de referência que

provaram fornecer durabilidade a longo prazo de concreto armado exposto a cloretos em laboratório ou em serviço.

Por razões práticas, os critérios prescritivos estão amplamente incluídos nas normas para estruturas duráveis de concreto armado. As diretrizes referentes à durabilidade do concreto armado no ambiente marinho estão incluídas nas normas (BS EN 206, 2013; ACI 201.2R, 2016; CIRSOC 201, 2005), em que critérios gerais são estabelecidos para garantir uma vida útil de 50 anos. Primeiro, o tipo de exposição a cloreto deve ser definido e avaliado de acordo com o nível de agressividade. Então, as características correspondentes para o cobrimento de concreto são necessárias.

Esses tipos de limites são fáceis e confiáveis quando examinados. No entanto, o projeto prescritivo para durabilidade não permite inferir a vida útil real. As normas modernas estão progressivamente incluindo critérios de projeto baseados em desempenho, mas grande esforço é necessário nesse sentido devido ao extenso trabalho experimental necessário para a validação de modelos.

Este artigo relata comparações entre o coeficiente de difusão de cloretos em condições saturadas e secas e propriedades tecnológicas como relação a/b , resistência à compressão, sortividade e penetração de água sob pressão. Os principais aspectos de conexão e desconexão em relação a essas comparações são analisados com base nos resultados experimentais.

2. PROJETO PRESCRITIVO PARA A DURABILIDADE NO AMBIENTE MARINHO

2.1. Relação água/ligante

A porosidade capilar da matriz cimentícia é função da relação a/g , dado certos graus de hidratação e compactação. Durante o período de iniciação, a disponibilidade de porosidade conectada que permite a umidade e o transporte de íons é essencial para o desenvolvimento do processo de deterioração. A limitação a um máximo fator a/g leva a uma diminuição no volume de porosidade capilar no concreto. Esta redução na relação a/g deve ser complementada com um tratamento de cura adequado que permita um progresso suficiente da hidratação do cimento, bem como uma consolidação eficiente que elimine os macroporos.

A influência de a/g na difusividade de cloreto no concreto tem sido amplamente investigada (ACI 222, 2003). No entanto, sua utilidade como parâmetro de prescrição não pode ser sustentada apenas pela confirmação da incidência. O JSCE propõe uma relação potencial entre a/g e difusividade através do concreto (Song et al., 2008), mas, como dito, outros parâmetros afetivos inter-relacionados causam um desvio significativo desta relação. Portanto, propriedades de concreto significativamente relacionadas à relação água/aglomerante são geralmente prescritas.

Isso também é devido às dificuldades em controlar a relação a/g no campo, já que não há um método experimental confiável disponível.

Em relação à corrosão ativa da armadura, o fluxo de oxigênio através do concreto também é uma função da redução de a/g (ACI 222, 2003). Tanto o cloreto quanto a difusão de oxigênio estão conectados com a relação entre permeabilidade e a/g .

2.2. Teor de cimento

O teor de cimento é determinante para a durabilidade no ambiente marinho em vários aspectos. Primeiro, para uma certa relação a/g , mais cimento significa maior volume de pasta no concreto. O uso de misturas que reduzem a água pode contribuir para reduzir o teor de cimento no concreto. A redução do teor de pasta no concreto é potencialmente um efeito benéfico, pois os agregados são geralmente menos porosos que a matriz e o aumento de sua quantidade ajuda a reduzir as propriedades de transporte do concreto, desde que seja aplicada a compactação adequada.

Por outro lado, o C_3A contido no cimento é o maior contribuinte para a capacidade de ligação do cloreto no concreto, e esta característica é dependente do tipo e quantidade de cimento (Andrade,

1993; Delagrave et al., 1997b). A ligação de cloreto é um processo de retardamento da entrada de cloreto, e a vida útil aumenta quando a ligação de cloreto é aumentada. Então, aumentar o teor de cimento no concreto significa aumentar a capacidade de ligação ao cloreto.

Materiais cimentícios suplementares contidos no cimento afetam a durabilidade no ambiente marinho por dois efeitos opostos, diluição e ação pozolânica. Esses efeitos não são tão marcantes nos resultados dos métodos de ensaio acelerados, mas são verificados mais extensivamente com o tempo. Por essa razão, alguns procedimentos tentam considerar a reatividade tardia de materiais cimentícios suplementares. Em qualquer caso, mudanças significativas com o tempo são causadas dependendo do tipo de cimento.

2.3. Resistência à compressão

Como dito, a relação a/g é o parâmetro mais importante em relação às propriedades de transporte do concreto. Esta ferramenta de projeto é difícil de ser controlada no campo. Então, sua relação com a resistência à compressão, que foi extensamente provada e explicada com base na conformação da estrutura do poro, é usada para o projeto. Essa relação direta é a mais desenvolvida no campo da tecnologia de concreto. Portanto, uma base forte para o uso da resistência à compressão como um parâmetro de avaliação para virtualmente qualquer outra propriedade do concreto, incluindo a difusividade do cloreto, está disponível.

Como esperado, a difusividade no estado saturado diminui consistentemente com o aumento da resistência à compressão, e relações empíricas simples entre a resistência à compressão em 28 dias e a difusividade do cloreto do concreto foram determinadas (Frederiksen et al., 1997). Essas relações provavelmente são afetadas pelo as incorporado. Diferenças causadas pelo tipo de cimento e práticas para acelerar o ganho de resistência (tratamento de cura, aditivos) também são esperadas. Entretanto, o fator determinante para o uso da resistência à compressão como parâmetro de controle é sua praticidade, custo e universalidade. Então, é muito facilmente implementado e interpretado. A aplicação deste parâmetro de controle mostrou um grau de sucesso muito variável, e esta é a razão para a aplicação de parâmetros de controle mais abrangentes para durabilidade no ambiente marinho.

2.4. Sortividade

A taxa de absorção capilar da água é um dos mecanismos de transporte através dos quais o cloreto pode penetrar no concreto no ambiente marinho. Esta propriedade é um descritor eficaz da estrutura de poros do concreto. A absorção capilar se desenvolve em concreto não saturado e pode transportar cloreto no concreto à medida que a frente molhada progride. No entanto, a difusão pura ocorre apenas quando não é produzido fluxo líquido e, nesse sentido, é diferente da absorção capilar. Os tamanhos dos poros que participam nos dois processos e nos próprios processos são diferentes.

Apesar disso, correlações justas entre capilaridade e difusão de cloretos são apresentadas na literatura (Basheer, 2001; Kropp e Basheer, 2000). Essas relações dependem dos métodos de ensaio aplicados para a determinação de cada propriedade, que são muito sensíveis ao pré-condicionamento. Neste sentido, uma alta sensibilidade do valor obtido para a sortividade para testar condições e proporções de constituintes do concreto foi documentada (Taus, 2010; Bjevović et al., 2015).

Além disso, deve ser feita uma consideração particular pelo seu contraste com a difusão de cloretos em condições secas, pois neste caso apenas parte da estrutura do poro intervém no processo de transporte. A correlação direta entre a difusividade do cloreto e a sortividade pode, portanto, ser afetada pelo grau de saturação do concreto.

2.4. Permeabilidade

No caso de estruturas submetidas a uma diferença de pressão hidrostática, a permeabilidade é o parâmetro que melhor representa a penetração de substâncias agressivas do meio externo, e.g transporte de cloreto em estruturas de água do mar. Além disso, alta resistência à penetração de cloretos para concreto de baixa permeabilidade foi obtida em conexão com a conectividade limitada da estrutura porosa (CCAA, 2009). Novamente, os processos de penetração de água sob pressão e difusão de cloretos são diferentes, especialmente considerando sua correspondência com o grau de saturação do concreto.

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

Os traços de concreto estudados foram 28 no total, com múltiplos lotes para a maioria deles, perfazendo um total de 73 lotes. Proporções de concretos estudados correspondentes a a/g entre 0,39 e 0,61, com teores de cimento entre 425 e 250 kg / m³. Três tipos de cimento Portland utilizados foram: Comum (OPC), Calcário (LPC, incorporando 17% de calcário) e Composto (CPC, 17% e 12% incorporação de calcário e escória, respectivamente). Agregados de granito triturados com tamanhos máximos de 19 e 25 mm foram utilizados como agregados graúdos.

O agregado fino era areia de rio siliciosa. Materiais com conteúdo desprezível de cloreto foram utilizados. O teor de cloretos do concreto proveniente de constituintes (IRAM 1857, 2000) foi em todos os casos inferior a 0,03%. Para mais detalhes sobre as proporções desses concretos, favor consultar (Violini et al., 2006; Taus et al., 2008; Villagrán Zaccardi, 2012).

Ensaio foram conduzidos para determinar a conformidade de misturas de concreto com parâmetros prescritivos. Estes incluem resistência à compressão, medida em corpos de prova cilíndricos de 15x30cm de diâmetro e altura, compactados e testados de acordo com IRAM 1524, 1546 e 1553, taxa de absorção capilar, determinada de acordo com IRAM 1871 (IRAM 1871, 2004) e penetração de água sob pressão de acordo para o IRAM 1554 (IRAM 1554, 1983). Todos os corpos de prova foram compactados manualmente, desmoldados após 24 horas da moldagem e curados em câmara úmida (Temp: 23 ± 2 ° C; UR > 95%) até a idade de 28 dias.

A taxa de transporte de cloreto foi avaliada em corpos de prova prismáticos de 7,5x15x25 cm³. Após o tratamento de cura, estas amostras foram impermeabilizadas com tinta de borracha clorada em todos os lados, com exceção da superfície de moldagem, da qual era permitida a entrada unidirecional de cloreto. As amostras foram expostas em ambiente marinho natural e imersas em solução de cloreto de sódio, com a face de entrada ajustada como o lado superior horizontal. Assim, eles foram expostos com a mesma posição em que foram moldadas.

A exposição do ambiente natural marinho ocorreu na cidade de Mar del Plata, na Argentina, a aproximadamente 50 metros da linha de costa e 5 m acima do nível médio do mar. O contato direto entre as amostras e a água do mar não ocorreu em nenhum momento durante a exposição, e a única fonte de cloretos foi a maresia.

Corpos de prova expostos em imersão foram primeiro saturados por 24h em água saturada de cal, e então submergidos em solução de NaCl a 30 g / l mantida a 23 ± 5 ° C até a retificação.

Perfis de ingresso de cloreto foram analisados após 12 meses de exposição para amostras no ambiente marinho e após 6 meses para amostras em imersão. Primeiro, os lados pintados foram descartados em uma espessura aproximada de 1 cm. Em seguida, cortes paralelos à face de entrada foram feitos, obtendo-se fatias progressivas de cerca de 5 mm. Profundidades médias da superfície de entrada foram medidas para cada fatia. Todos os cortes foram feitos em condição seca com um disco diamantado. Posteriormente, as fatias foram pulverizadas, e a quantidade de cloreto solúvel em ácido foi determinada de acordo com IRAM 1857, método C (IRAM 1857, 2000).

Regressões de dados para a solução mais comum da segunda lei de Fick, Equação (1) foram realizadas, e os valores para D_{ap} foram determinados. Nos casos em que o comportamento não-Fickiano foi detectado, o procedimento indicado em (Andrade et al., 2015) foi seguido.

$$C_{(x,t)} = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right) \quad (1)$$

Onde $C_{(x,t)}$ é a quantidade de cloreto na profundidade x , no tempo t , erf é a função de erro, C_s é a quantidade aparente de cloreto de superfície no tempo t , e D_{ap} é a difusividade aparente não estacionária.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A penetração de cloreto é impulsionada pelo gradiente de concentração entre a superfície e o interior do concreto. Em consequência, os teores de cloreto que penetravam no concreto em imersão eram até três vezes maiores que os determinados no concreto na exposição atmosférica marítima. Além disso, ao contrário da penetração sob exposição atmosférica, em concreto saturado, toda a porosidade é ocupada por solução de poros, que constitui o meio pelo qual o cloreto entra. Então, uma penetração mais rápida em concreto saturado do que em insaturado é óbvia.

A quantidade da solução de poros irá definir principalmente a correlação entre as taxas de penetração em amostras submersas e expostas ao ambiente marinho. Essa quantidade não permanece constante em amostras sob exposição atmosférica, pois é influenciada pelas condições climáticas, especialmente na zona mais externa. Portanto, a comparação deve levar em conta que ambos os mecanismos de entrada não são totalmente equivalentes e o contraste é meramente empírico.

Além disso, em um ambiente marinho com condições climáticas diferentes do considerado neste estudo, diferentes equilíbrios higroscópicos com o ambiente do concreto resultarão em uma quantidade diferente da solução de poros e diferentes ciclos de molhamento e secagem.

A partir dos perfis de penetração, a comparação direta entre os valores computados para a difusividade em amostras expostas no ambiente marinho natural (D_{atm}) e imerso (D_{imm}), é mostrada na Figura 1. Observa-se uma notável tendência com pouco impacto do tipo cimento.

Para baixas taxas de penetração, maiores incrementos para D_{atm} do que para D_{imm} são revelados. Esta relação parece inverter sobre um certo valor, e para taxas elevadas da penetração, os incrementos menores para D_{atm} do que para D_{imm} são notados. Isso pode ser explicado pelo conceito mencionado anteriormente. A distribuição do tamanho dos poros e a porosidade total estão conectadas. As baixas difusividades correspondem a misturas de concreto com baixa porosidade. Nestes casos, o líquido poroso permanece em um volume relativamente maior de pequenos poros de concreto sob exposição atmosférica.

À medida que a porosidade aumenta, poros maiores contribuem para a penetração de cloreto quando o concreto está em imersão, mas eles não permanecem saturados no concreto sob condições atmosféricas. Isto é, mudanças na difusividade relacionam-se mais diretamente à mudança no volume total de poros quando o concreto está saturado, já que toda a porosidade contribui para o mecanismo de transporte. Pelo contrário, apenas os poros mais finos contribuem para o transporte em concreto insaturado, e o D_{atm} não continua aumentando na mesma proporção com o aumento do volume de macroporos (Saetta et al., 1993; Climent et al., 2002; Nielsen e Geiker, 2003; Zhang e Zhang, 2014).

A figura 2 mostra D_{atm} e D_{imm} comparados com a/g. Apesar da capacidade potencialmente diferente de ligação ao cloreto, não podem ser estabelecidas diferenças estatisticamente significativas entre os diferentes tipos de cimento. A influência de a/g muito esconde qualquer diferença.

Como esperado, os valores crescentes de difusividade são obtidos com o aumento de a/g. No entanto, variações significativas dentro de cada a/g foram obtidas. A influência das outras variáveis (grau de hidratação, tamanho máximo do agregado e teor de cimento) é a principal razão para isso.

É particularmente importante notar que a soma dessas influências pode resultar em um grau de impacto semelhante à variação da razão a/g , especialmente para difusividades determinadas na condição insaturada.

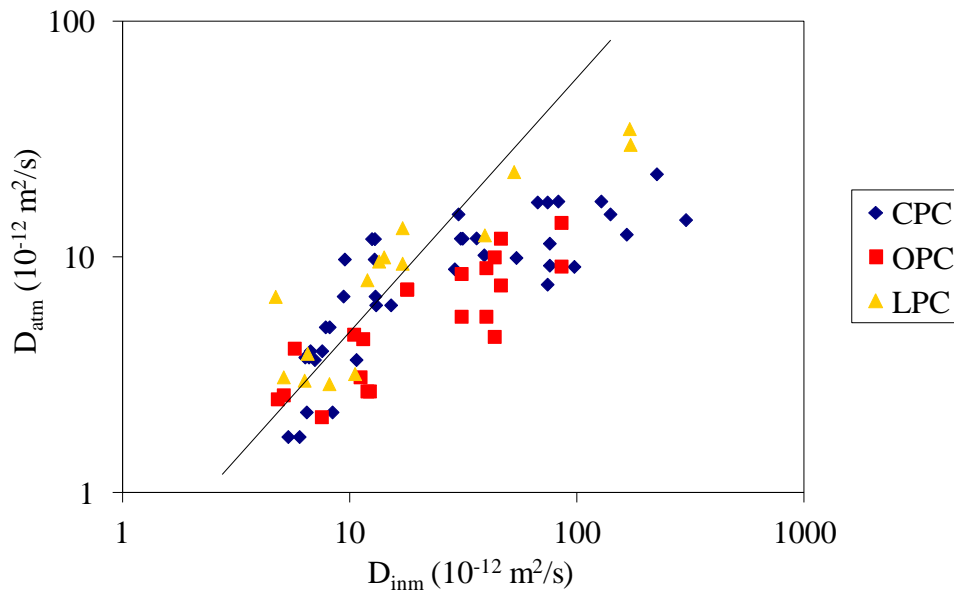


Figura 1. D_{inm} versus D_{atm} .

A diferenciação entre valores de difusividade quando em imersão ou atmosférica é mais pronunciada com maior a/g (D_{inm} aumenta muito mais que D_{atm} com aumento da relação a/g). A porosidade do concreto aumenta com a/g , mas esta porosidade aumentada resulta em mais conteúdo de líquido poroso somente no estado saturado. Os macroporos não afetam da mesma maneira as amostras expostas à atmosfera. Em condições não saturadas, o volume de líquido poroso é definido pelos finos poros capilares, onde mais ou menos condensação ocorrerá dependendo da umidade relativa. Nesta faixa de tamanhos de poros, a/g tem menor significância em relação à fração volumétrica de poros que participam do processo de transporte.

Nesse sentido, os parâmetros de engenharia de transporte, como a sorvidade e a penetrabilidade sob pressão, estão relacionados ao volume e à conectividade da estrutura porosa. Eles estão, portanto, indiretamente conectados à difusividade do cloreto em concreto saturado (como mostrado mais adiante nas Figuras 3, 5 e 6).

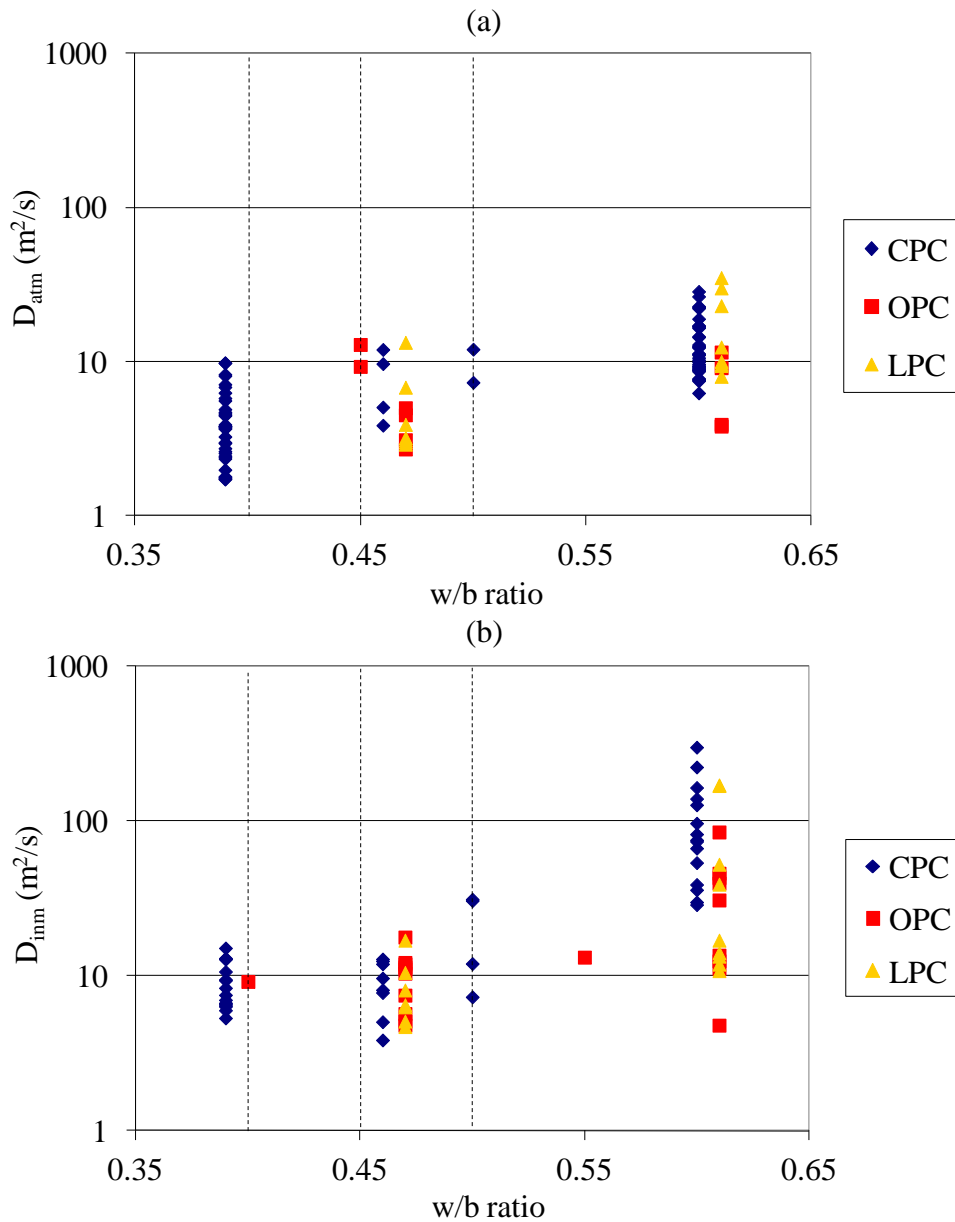


Figura 2. (a) D_{atm} e (b) D_{inm} , versus w/b.

A Figura 3 mostra as comparações entre a capilaridade e a difusividade. Novamente, a variação na capilaridade é maior que a variação no D_{atm} . A variação na taxa de absorção capilar está mais diretamente relacionada com o D_{inm} . A variabilidade de capilaridade é maior que a correspondente ao a/g. Isso indica quão inadequado é o a/g para definir a taxa de transporte no concreto. Como no caso da difusividade, outros fatores diferentes do a/g também estão afetando a taxa de transporte, e estes são levados em consideração somente quando a própria propriedade de transporte é medida. A Fig. 2 mostra um número significativo de valores de conformidade por a/g (valores de 0,40, 0,45 e 0,50 são geralmente aceitos dependendo do ambiente e da consideração de concreto armado ou protendido). Este número é certamente reduzido quando os limites são baseados em um limite tolerável para a capacidade de leitura. Deve-se mencionar que a correspondência entre a relação a/g e a taxa de absorção capilar certamente será diferente no concreto feito com aditivos redutores de água, que permitem menor mistura de água (e, conseqüentemente, volume de pasta) para o mesmo nível de consistência. Nesse caso, estima-se que a taxa de absorção capilar pode diminuir para o mesmo a/g.

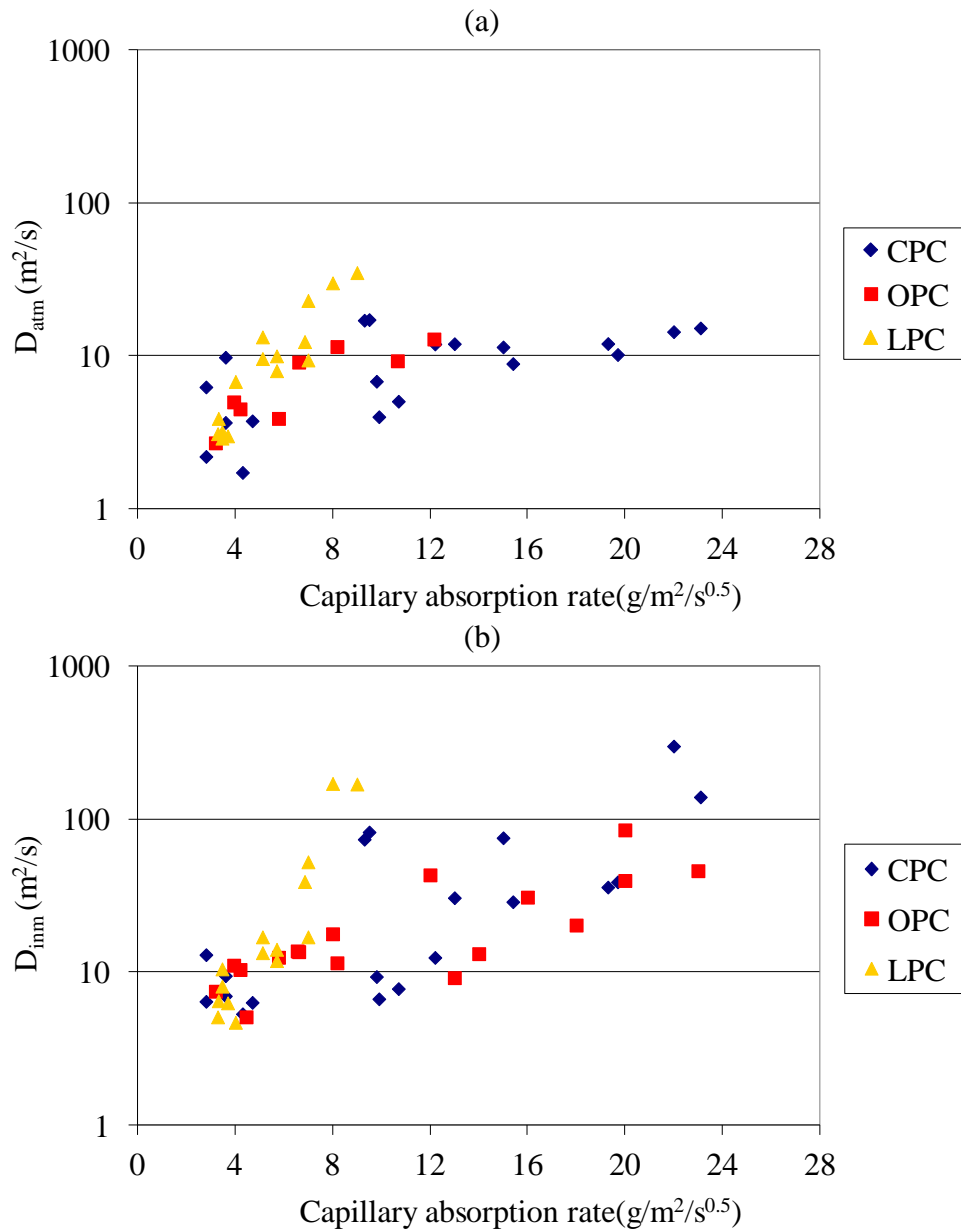


Figura 3. (a) D_{atm} e (b) D_{imm} versus sorvidade.

Na Figura 4, as comparações entre difusividades e resistência à compressão são apresentadas. Uma evolução inversa é obtida como consequência das relações opostas de ambas as propriedades com a porosidade. Uma maior dispersão é observada para D_{imm} do que para D_{atm} . O número de valores de conformidade de acordo com a resistência é semelhante ao de acordo com a/g . Assim, a relação direta entre resistência e a/g permite um procedimento de controle confiável pelo primeiro, a fim de assegurar a conformidade do segundo.

Este é um aspecto de necessidade prática devido à falta de métodos confiáveis para o controle experimental do a/g em concreto fresco. Por outro lado, deve-se mencionar que a resistência do concreto de cobertura na estrutura será grandemente afetada pelo grau de consolidação, que por sua vez é altamente dependente das práticas de campo.

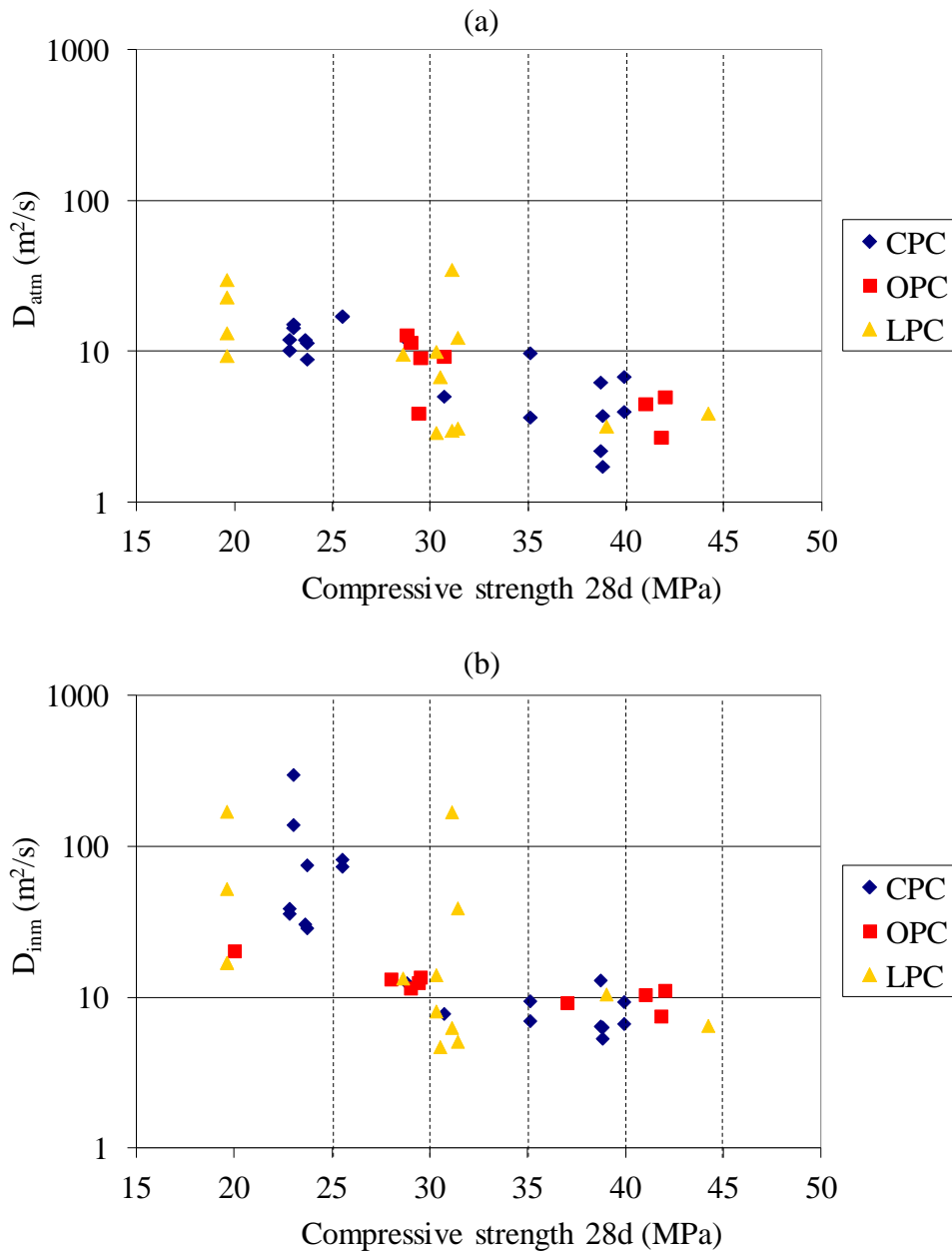


Figura 4. (a) D_{atm} e (b) D_{inm} versus resistência à compressão.

A determinação experimental do índice de compactação de concreto fresco é então aconselhável para definir a sensibilidade do concreto à compactação e estabelecer um risco relativo indicativo para o nível necessário de controle durante o lançamento do concreto fresco. Na prática, a falta dessa consideração comumente leva a resultados ruins em relação à durabilidade da estrutura.

Nas Figuras 5 e 6, são apresentadas as comparações entre difusividades e penetração de água sob pressão, média e máxima, respectivamente.

A proporção de valores de conformidade mostra a penetração da água sob pressão como uma propriedade menos desafiadora do que a sorvidade.

A conformidade das profundidades média e máxima de penetração da água é equivalente. Os defeitos de compactação na amostra são necessários para obter uma diferença significativa entre esses dois parâmetros.

A boa correspondência de valores mostra que este não foi o caso de nenhuma das amostras testadas. Com isto em mente, deve-se observar o uso muito limitado da penetração máxima de água sob pressão em relação à penetração de cloretos e outras propriedades de transporte do concreto.

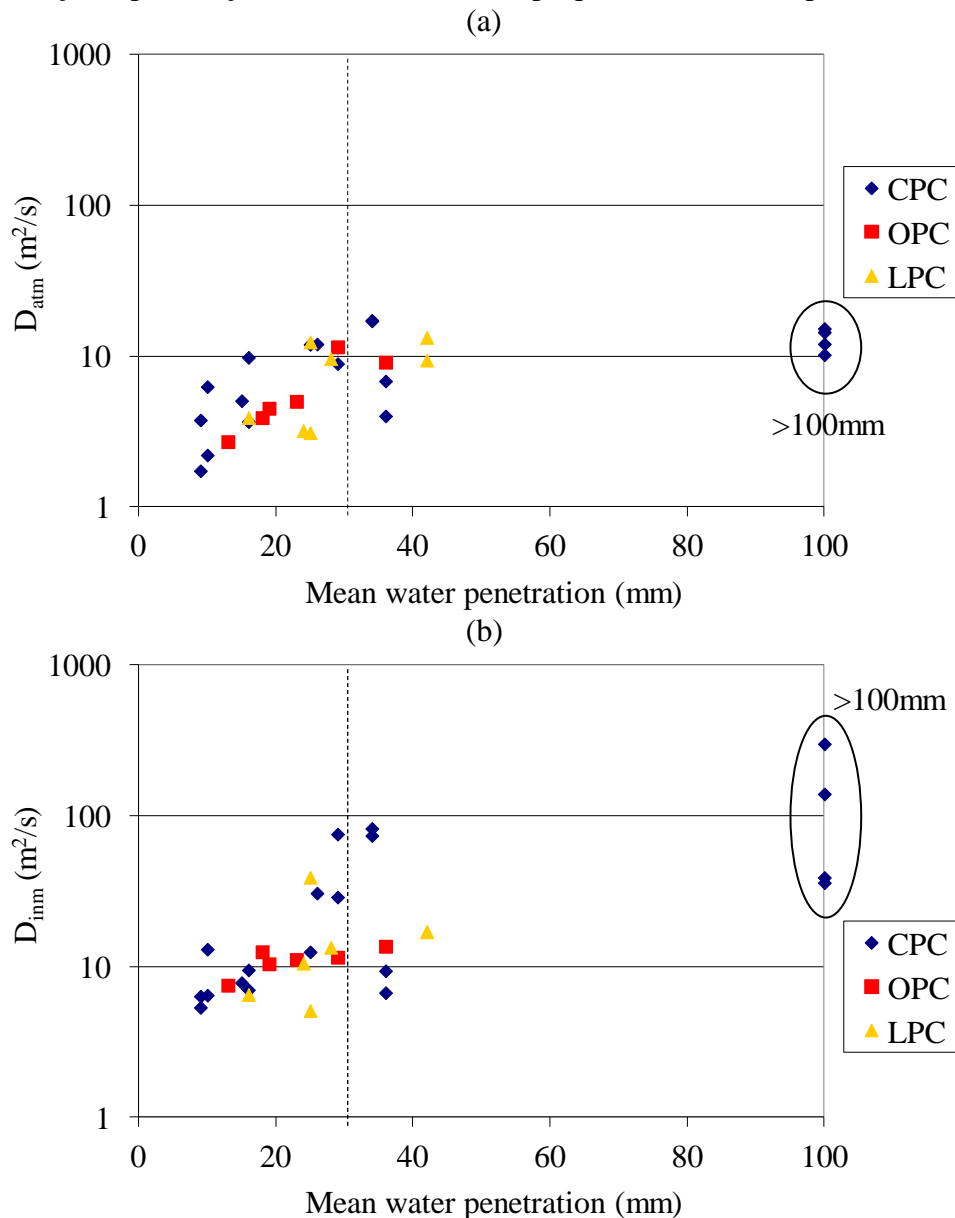


Figura 5. (a) D_{atm} e (b) D_{imm} vs. penetração média de água sob pressão.

Dentre os parâmetros analisados, a sortividade foi a que apresentou melhor correlação com a difusividade do cloreto. A resistência à compressão, a/g , penetração de água sob pressão seguiu-se nessa ordem. Isso é notável no sentido de que a penetração de água sob pressão pode ser erroneamente recomendada em relação à resistência à compressão para a estimativa da penetração de cloretos no concreto, considerando apenas que as propriedades de transporte devem estar melhor conectadas entre si.

No entanto, todas as propriedades examinadas mostraram uma melhor correlação com a difusividade do cloreto na condição saturada. Para o concreto insaturado, os macroporos não participam do processo de entrada de cloretos, mas sim em outros processos, como absorção e penetração de água. Portanto, concreto não saturado com alta a/g tende a ser classificado como menos durável no ambiente marinho quando testado para penetração de água ou sortividade sob

pressão do que para taxa de entrada de cloreto em si. O grau de saturação do concreto é um aspecto importante que deve ser sempre considerado a esse respeito.

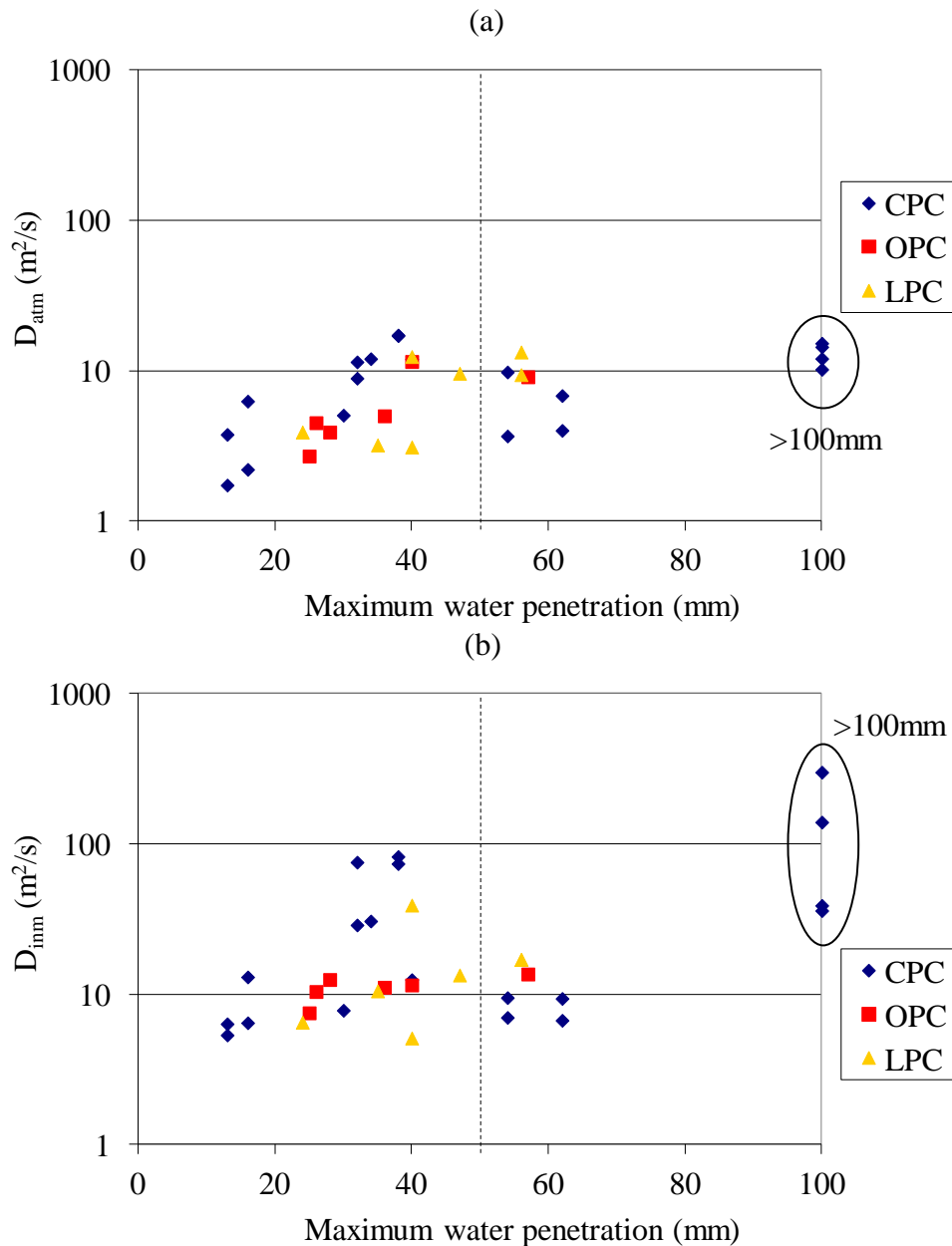


Figura 6. (a) D_{atm} e (b) D_{imm} vs máxima penetração de água sob pressão.

5. CONCLUSÕES

A razão a/g é o parâmetro tecnológico que determina a taxa de entrada de cloretos no concreto. No entanto, outros parâmetros também afetam essa propriedade de transporte, como grau de hidratação, tamanho máximo de agregado, grau de compactação e teor de cimento, e, em combinação, seu efeito pode exceder aquele a partir de a/g . Portanto, a relação a/g como um parâmetro de projeto para durabilidade no ambiente marinho requer a assistência de prescrições complementares para propriedades de transporte.

A taxa de absorção capilar demonstrou uma correlação consistente com a taxa de difusão de cloretos na condição saturada. É conveniente expandir o banco de dados para essa correlação, a

Limitações da taxa de absorção capilar e da permeabilidade à água para a estimativa da taxa de penetração de cloreto em concreto em relação ao projeto prescritivo para durabilidade em ambiente marinho

fim de fazer previsões confiáveis com base nessas aplicações em projeto prescritivo. No entanto, a ligação entre a capacidade de sorção e a difusão de cloretos no concreto insaturado é menos consistente, já que a faixa de tamanho de poros que participa de cada mecanismo de transporte é diferente.

A penetração de água sob pressão mostrou pouca aplicação para o projeto de durabilidade em relação à penetração de cloretos no concreto. Neste sentido, a resistência à compressão é considerada mais prática e confiável para estimar o desempenho do concreto no ambiente marinho. Portanto, nenhum valor adicionado de penetração de água sob pressão sobre a resistência à compressão é antecipado. Uma exceção poderia ser feita para a penetração de cloretos em concreto saturado, onde a taxa de penetração de cloretos pode ser melhor antecipada pela máxima penetração de água sob pressão do que para o caso de concreto insaturado.

Como resultado, dados combinados de taxa de absorção capilar e resistência à compressão parecem funcionar bem como parâmetros prescritivos para a durabilidade no ambiente marinho. Em muitos casos, a determinação da taxa de absorção capilar enfrenta alguns inconvenientes práticos para a sua aplicação no campo, principalmente devido à sua sensibilidade às variáveis de ensaio e ao tempo de ensaio requerido. Os valores dos limites prescritivos para capilaridade ainda são uma questão de estudo.

6. AGRADECIMENTOS

A professora Carmen Andrade é uma grande inspiradora para cientistas e engenheiros que trabalham com durabilidade em concreto armado em todo o mundo. Ela procurou permanentemente métodos simples, práticos e precisos para engenheiros, e precisos e abrangentes para os cientistas. Nós realmente apreciamos o conselho e apoio que recebemos dela ao longo dos anos.

7. REFERÊNCIAS

- America Concrete Institute (2016), *"ACI 201.2R-16 Guide to Durable Concrete"*, Farmington Hills, USA, p. 84.
- America Concrete Institute (2003), *"ACI 222.3R-03 Design and Construction Practices to Mitigate Corrosion of Reinforcement in Concrete Structures"*, Farmington Hills, USA, 29p.
- Andrade, C. (1993), *"Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements"*, Cement and Concrete Research, Vol. 23, pp. 724-742. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90023-3)
- Andrade, C., Castellote, M., Alonso, C., González, C. (2000) *"Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests. Part I: Comparison between several methods of calculation"*, Materials and Structures, Vol. 33, pp. 21-28. <https://doi.org/10.1007/BF02481692>
- Andrade, C., Alonso, C., Sarria, J. (2002) *"Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere"*, Cement & Concrete Composites, Vol. 24, pp. 55-64. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00026-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00026-9)
- Andrade C., Prieto, M., Tanner, P., Tavares, F., d'Andrea, R. (2013) *"Testing and modelling chloride penetration into concrete"*, Construction and Building Materials, Vol. 39, pp. 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.012>
- Andrade, C., Climent, M. A., de Vera, G. (2015) *"Procedure for calculating the chloride diffusion coefficient and surface concentration from a profile having a maximum beyond the concrete surface"*, Materials and Structures, Vol. 48, pp. 863-869. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0543-4>

- Anoop, M. B., Rao, K. B., Rao, T. V. S. R. A. (2002), "Application of fuzzy sets for estimating service life of reinforced concrete structural members in corrosive environments", Engineering Structures, Vol. 24, pp. 1229-1242. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00060-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00060-3)
- Basheer, P. A. M. (2001), "Permeation Analysis", in: Ramachandran, V. S., Beaudoin, J. J. (Eds.), Handbook of analytical techniques in concrete science and technology. Principles, Techniques and Applications, Noyes Publications, New Jersey (USA), pp. 658-737.
- Bjegović, D., Serdar, M., Oslaković, I. S., Jacobs, F., Beushausen, H., Andrade, C., Monteiro, A. V., Paulini, P., Nanukuttan S. (2015) "Test Methods for Concrete Durability Indicators", in: Beushausen, H., Fernández Luco, L. (Eds.), Performance Based Specifications and Control of Concrete Durability. State-of-the-Art Report RILEM TC 230-PSC, Springer, New York (USA), pp. 51-105. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7309-6_4
- British Standards Institution (2013), " BS EN-206: Concrete. Specification, performance, production and conformity," (London, UK: CEN), p. 106.
- CCAA (2009) "Chloride Resistance of Concrete", (Sydney, Australia: Cement Concrete & Aggregates Australia), p. 37.
- CIRSOC 201-2005 (2005), "Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón", (Buenos Aires, Argentina: INTI), p. 452.
- Climent, M. A., de Vera, G., López, J. F., Viqueira, E., Andrade, C. (2002), "A test method for measuring chloride diffusion coefficients through non-saturated concrete. Part I: the instantaneous plane source diffusion case", Cement and Concrete Research, Vol. 32, p. 1113–1123. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00750-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00750-0)
- Colleparidi, L., Marcialis, A., Turriziani, R. (1970), "La cinetica di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo", Il Cemento, N°67, pp. 157-164.
- Delagrave, A., Bigas, J. P., Ollivier, J. P., Marchand, J., Pigeon, M. (1997a), "Influence of the interfacial zone chloride diffusivity of mortars", Advanced Cement Based Materials, Vol. 5, pp. 86-92. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(96\)00008-9](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(96)00008-9)
- Delagrave, A., Marchand, J., Ollivier, J. O., Juliens, S., Hazrati, K. (1997b), "Chloride binding capacity of various hydrated cement paste systems", Advanced Cement Based Materials, Vol. 6, pp. 28-35. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)90003-1](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)90003-1)
- Di Maio, A. A., Eperjesi, L., Gassa, L., Traversa, L. P., Zerbino, R. L., (2000) "Exposed reinforcement: Assessment of corrosion activity", Concrete International, Vol. 22, N°3, pp. 47-51.
- Di Maio, A. A., Lima, L. J., Traversa, L. P. (2004) "Chloride profiles and diffusion coefficients in structures located in marine environments", Structural Concrete, Vol. 5, N°1, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1680/stco.2004.5.1.1>
- DURAR (1997), "DURAR - Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado", (Maracaibo, Vanezuela: CYTED), p. 205.
- Fernández Luco, L., "La durabilidad del Hormigón: su relación con la estructura de poros y los mecanismos de transporte de fluidos", in: E. F. Irassar (Ed.), Durabilidad del Hormigón Estructural, AATH, Buenos Aires (Argentina), (2001), pp. 1-45.
- Frederiksen, J. M., Sørensen, H. E., Andersen, A., Klinghoffer, O. (1997) "HETEK, The effect of the w/c ratio on chloride transport into concrete - Immersion, migration and resistivity tests", (Copenhagen, Denmark: The Road Directorate), 35 p. <https://doi.org/10.13140/2.1.3735.3600>
- Glass, G. K., Buenfeld, N. R. (2000), "The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete", Corrosion Science, Vol. 42, pp. 329-344. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(99\)00083-9](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00083-9)
- IRAM 1554 (1983), "Hormigón de Cemento Pórtland. Método de determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido", (Buenos Aires, Argentina: IRAM), p. 13.
- IRAM 1857 (2000), "Determinación del contenido de ión cloruro en el hormigón". (Buenos Aires, Argentina: IRAM), p. 19.

- IRAM 1871 (2004), "*Hormigón. Método para la determinación de la capacidad y velocidad de succión capilar de agua para hormigón endurecido*", (Buenos Aires, Argentina: IRAM), p. 12.
- Kropp, J., Basheer, L. (2000) "*Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: A Review*", in: Basheer, P.A.M. (Ed.), V CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Barcelona (Spain).
- Monosi, S., Moriconi, G., Alverá, I. (1989), "*Effect of water/cement ratio and curing time on chloride penetration into concrete*", *Materials Engineering*, Vol. 1, pp. 483-489.
- Neville, A. M. (1977), "*Concrete Technology, Volume 1*", (Mexico D.F., Mexico: IMCyC), p. 383.
- Nielsen, E. P., Geiker, M. R. (2003), "*Chloride diffusion in partially saturated cementitious material*", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, p. 133-138. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00939-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00939-0)
- Rostam, S. (2000), "*Vida útil de las estructuras de hormigón. Cómo satisfacer los requerimientos del nuevo milenio*", *Hormigón*, N°36, pp. 11-44.
- Saetta, A. V., Scotta, R. V., Vitaliani, R. V. (1993), "*Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete*", *ACI Materials Journal*, Vol. 90, p. 441–451.
- Sandberg, P., Tang, L., Andersen, A. (1998), "*Recurrent studies of chloride ingress in uncracked marine concrete at various exposure times and elevations*", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, pp. 1489-1503. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00124-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00124-0)
- Song, H. -W., Lee, C. -H., Ann, K. Y., (2008) "*Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments*", *Cement & concrete Composites*, Vol. 30, pp. 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.005>
- Taus, V. L., "*Análisis de la Succión Capilar en Hormigones: Influencia de distintos Parámetros de Ensayo*", MSc Thesis, UNCPBA, (2010) p. 170.
- Taus, V. L., Villagrán, Y. A., Di Maio, A. A. (2008), "*Influence of curing conditions on transport properties of blended cement concrete*", in: Pazzini et al. (Eds.), Fifth ACI/CANMET International Conference on High-Performance Concrete Structures and Materials, Manaus (Brazil).
- Traversa, L. P. (2001) "*Corrosión de armaduras en atmósferas rurales, urbanas, marinas e industriales*", in: E.F. Irassar (Ed.), *Durabilidad del Hormigón Estructural*, AATH, Buenos Aires (Argentina), (2001), pp 217-257.
- Traversa, L. P., Di Maio, A. A. (2002) "*Difusión de cloruros en el hormigón*", in: L. P. Traversa, A. A. Di Maio (Eds.), *Memoria Jornadas Tecnológicas sobre Corrosión de Armaduras en Estructuras de Hormigón: Evaluación, Diagnóstico y Reparación*, AATH, Mar del Plata (Argentina), pp. 87-95.
- Tuutti, K., "*Corrosion of steel in concrete*", PhD Thesis, SCCI, CIB, Research Report No. 4, (1982) p. 468.
- Villagrán Zaccardi, Y. A., "*Estimaciones del ingreso de cloruro en hromigón y de la despasivación localizada de armaduras*", PhD Thesis, UNLP (2012), p. 226.
- Violini, D., Giaccio, G., Milanese, C. A., Zerbino, R. (2006), "*Efecto del contenido de caliza, en las propiedades del hormigón. Parte 3: Evaluación de la durabilidad*", in: Sota et al. (Eds.), 16ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Córdoba (Argentina).
- Zhang, Y., Zhang, M. (2014), "*Transport properties in unsaturated cement-based materials – A review*", *Construction and Building Materials*, Vol. 72, p. 367-379. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.037>