
Copyright 2018, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2018, em São Paulo, no mês de maio de 2018.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Proposta de estudo de técnicas não destrutivas para determinação do teor de umidade interna do concreto

Lucas C. Nascimento^a, Adriana de Araújo^b, Kléber J. Oliveira^c, Valdecir A. Quarcioni^d

Abstract

The durability of concrete structures is closely related to the physic-mechanical properties of this material. One of the main parameters related to the durability of concrete is the moisture content. However, its evaluation on field is unusual and often impracticable, since the methods usually adopted for its determination are of restricted use to the laboratory environment, as the case of densitometry and the gravimetric method by mass recording of test. In the international scenario, it has recently been found that these methods of moisture content determination have been associated with nondestructive tests (NDTs) for evaluating the quality of concrete, such as the determination of the moisture content by microwave emitter equipment. The present work brings together important techniques in the internal moisture content of the concrete evaluation and, through the use of nondestructive techniques, purpose an experimental program in laboratory scale to provide important information about the effectiveness of the microwave emitter associated to the determination of the electrical resistivity in the moisture of concretes evaluation for different concrete compositions submitted to varied conditions of humidification.

Keywords: concrete, microstructure, moisture content, nondestructive test, microwave emitter, electrical resistivity.

Resumo

A durabilidade das estruturas de concreto está intimamente relacionada com as propriedades físico-mecânicas deste material. Um dos principais parâmetros referentes à durabilidade do concreto é o teor de umidade, entretanto, sua avaliação em campo é incomum e muitas vezes, inviável, visto que os métodos usualmente adotados para sua determinação são de utilização restrita ao ambiente laboratorial, como o caso da densitometria gama e o método gravimétrico por registro de massa. No cenário internacional, verifica-se que recentemente esses métodos de determinação do teor de umidade têm sido associados a ensaios não destrutivos (ENDs) na avaliação da qualidade do concreto, como é o caso da determinação do teor de umidade com auxílio de equipamento emissor de micro-ondas. O presente trabalho reúne técnicas importantes de avaliação da umidade interna do concreto e, por meio da utilização de técnicas não destrutivas, propõe um programa experimental em escala laboratorial com vistas a

^a Mestrando em Habitação, Bolsista do Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC, Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT (e-mail: lucascn@ipt.br).

^b Mestre em Habitação, Pesquisadora do Laboratório de Corrosão e Proteção – LCP/IPT (e-mail: aaraujo@ipt.br).

^c Mestrando em Engenharia Elétrica, Pesquisador Assistente do Laboratório de Equipamentos Elétricos e Ópticos – LEO/ IPT (e-mail: kleberjo@ipt.br).

^d Doutor em Engenharia Civil, Chefe do LMCC/ IPT (e-mail: quarciva@ipt.br).

fornecer informações importantes a respeito da eficácia do emissor de micro-ondas associado à determinação da resistividade elétrica na avaliação da umidade de concretos de diferentes composições submetidos a condições variadas de umidificação.

Palavras-chave: concreto, microestrutura, teor de umidade, ensaio não destrutivo, emissor de micro-ondas, resistividade elétrica.

Introdução

As técnicas de determinação das propriedades físicas, químicas e mecânicas do concreto são normalmente aplicadas na avaliação do estado de conservação das estruturas, tanto no ambiente laboratorial quanto em campo. Atualmente, há uma diversidade de procedimentos que são realizados e que permitem obter informações relevantes a respeito do comportamento do concreto ao longo dos anos de solicitação e de exposição à atmosfera.

Muitos dos ensaios não destrutivos (ENDs) comumente realizados em campo com essa finalidade são limitados quando ao diagnóstico de processos de degradação. Citam-se como exemplos os ensaios de dureza superficial, arrancamento e resistência à penetração, os quais se limitam a dar informações a respeito da homogeneidade e da evolução da resistência do concreto nas primeiras idades (1).

No caso dos ensaios laboratoriais, estes geralmente permitem a determinação de valores precisos e de considerável relevância na realização de um diagnóstico a respeito do estado da estrutura, bem como na ocorrência de processos de degradação. Porém, a maioria desses procedimentos requer a extração de testemunhos em campo, o que em muitos casos, dependendo da debilidade ou da configuração da estrutura, é inviável. Além disso, não é possível avaliar, por meio desses ensaios, o teor de umidade interna do material na estrutura, parâmetro fundamental nos processos de degradação do concreto e da armadura de elementos da estrutura em análise.

Com vistas a contribuir para a solução dessa problemática, o presente trabalho reúne informações a respeito das características do material concreto e seus processos de degradação, com ênfase na presença de água como agente primordial nas reações deletérias e ensaios ENDs de avaliação da umidade do concreto. Por fim, é proposto um programa experimental no qual são associadas as técnicas de emissão de micro-ondas e de resistividade elétrica, que é comumente realizada para determinação do potencial de corrosão das armaduras (2), ambas na determinação da umidade superficial e profunda do concreto. No programa em questão, concretos de diferentes composições serão produzidos, sendo uma parcela de cada composição submetida à carbonatação. Todas as amostras produzidas serão posteriormente acondicionadas em faixas variadas de umidade relativa ambiental (saturação total, 95 % UR, 75 % UR, 55 % UR e secagem) visando uma ampla avaliação da umidade interna do concreto.

O concreto e sua microestrutura

Por possuir uma parcela inerte (agregados) e um ligante (cimento) que reage quimicamente com a água, o concreto endurecido apresenta uma microestrutura complexa e heterogênea, composta, principalmente, por três fases: agregado, pasta de cimento hidratada e zona de interface pasta-agregado, também denominada de zona de transição (1).

A microestrutura do concreto exerce influência direta nas suas características físico-mecânicas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, sendo que cada uma das fases mencionadas possui maior ou menor parcela de influência nestas características. Os agregados, por exemplo, estão intimamente relacionados ao módulo de elasticidade, à massa unitária e à estabilidade dimensional do concreto no estado endurecido. Já a pasta de cimento influencia, principalmente, a fluência do concreto no estado fresco e sua porosidade no estado endurecido, enquanto a zona de transição influencia, principalmente, a resistência à compressão (1).

Cabe destacar a porosidade do concreto no estado endurecido, que além da influência direta nas propriedades físico-mecânicas do material, também está relacionada à penetração e retenção de água no concreto. A presença de água, por sua vez, é um fator primordial quando se trata de durabilidade, pois é um agente precursor em quase todos os processos de degradação química ou física no concreto (1,3).

A porosidade do concreto é representada por uma rede complexa e heterogênea de poros, cujo tamanho, distribuição e comunicação dependem de fatores intrínsecos à composição do concreto e às características dos materiais que o compõem. Segundo Mehta e Monteiro (1), existem três tipos principais de poros na microestrutura do concreto: espaços interlamelares no silicato de cálcio hidratado (C-S-H), poros capilares e poros de ar incorporado e aprisionado na mistura.

A estrutura do C-S-H é formada por diversos microcristais aglutinados, nos quais os espaços entre um e outro são denominados poros interlamelares. Esses poros possuem dimensões muito pequenas, que variam de 5 Å a 25 Å, e que não exercem influência significativa nas propriedades mecânicas do concreto. No entanto, quando da exposição a elevadas temperaturas, a água retida nesses poros pode evaporar e contribuir para a retração do material, acarretando no surgimento de fissuras e em perda considerável de resistência à compressão, dentre outras propriedades mecânicas do concreto (1).

Os poros capilares estão localizados na pasta de cimento hidratada e correspondem a todo o espaço não preenchido pela parcela sólida da pasta, formando uma estrutura porosa comunicante. O volume desses poros é determinado, principalmente, pela relação água/cimento (a/c) e pelo grau de hidratação do cimento. As suas dimensões podem variar entre 10 nm e 50 nm em pastas altamente hidratadas e com reduzido fator a/c , e variar entre 3 µm e 5 µm em pastas de elevado teor a/c (1,4).

Durante o processo de mistura do concreto, certa quantidade de ar fica retida na mistura, o que acarreta na formação de espaços esféricos, ao contrário dos poros capilares que possuem formas irregulares. O volume correspondente a esses poros compreende o ar aprisionado na mistura, e seus espaços geralmente apresentam dimensões de até 3 mm, o que faz com que

esses poros prejudiquem significativamente a resistência mecânica do concreto, bem como contribuir para o aumento da permeabilidade à água. Cabe mencionar que certos aditivos incorporam intencionalmente bolhas de ar para conferir propriedades especiais, como leveza e isolamento térmico. Essa incorporação acarreta também na formação de vazios do mesmo formato do ar aprisionado, porém devem apresentar dimensões menores, entre 50 μm e 200 μm (1,3).

Influência da umidade interna do concreto em processos de degradação das estruturas

A durabilidade do concreto está diretamente relacionada à agressividade ambiental à qual o material está exposto. A NBR 12655: 2015 (5), referente às especificações de preparo, controle, recebimento e aceitação do concreto de cimento Portland, enumera quatro principais classes de agressividade ambiental, relacionadas às condições de exposição e riscos que podem oferecer à integridade da estrutura. A classe I contempla ambientes de natureza rural e submersa, e é considerada a de menor agressividade. A classe II representa pequeno risco de deterioração da estrutura, e enquadra especificamente estruturas edificadas em ambientes urbanos. A classe III, por sua vez, engloba áreas industriais e a região marinha, representando grande risco de deterioração, enquanto que a classe IV, a mais agressiva, contempla regiões industriais com especificidades de agressão química, bem como áreas onde há respingos de maré, uma das condições mais prejudiciais à integridade do concreto (5).

Segundo Escadeillas e Hornain (3), concretos resistentes e duráveis são aqueles cujas características são adequadas ao uso e o ambiente no qual estão alocados. Desta forma, quando se trata de durabilidade de estruturas de concreto, é fundamental que os parâmetros de dosagem e as premissas para composição levem em consideração os requisitos físicos e mecânicos que o produto final deve atingir para garantir sua integridade quando da exposição ambiental.

Os processos de deterioração que o concreto está sujeito são diversos, mas é possível dizer que, essencialmente, ocorrem por meio de dois principais processos: dissolução e precipitação. A dissolução é a etapa onde ocorrem a dissociação propriamente dita e a hidrólise de compostos hidratados no cimento, que podem se dar com maior ou menor parcialidade de acordo com a natureza química do composto precursor do processo deletério (3).

Esse processo pode acarretar na liberação de íons agressivos que, entrando em contato com os compostos hidratados do cimento, afetam o equilíbrio entre a solução intersticial e os hidratos. Geralmente esse equilíbrio é restabelecido por uma nova dissolução de hidratos com surgimento de novos compostos que podem ou não ser nocivos ao concreto em razão de ocorrerem alterações significativas na sua microestrutura, ocasionando no aumento da porosidade e, conseqüentemente, facilidade de difusão e permeabilidade da água e de agentes agressivos (3).

No caso da precipitação, essas alterações microestruturais podem ser ainda mais agressivas caso os novos compostos formados contribuam para a ocorrência de reações de expansão e fissuração, as quais prejudicam a resistência e outras propriedades mecânicas, favorecendo, em alguns casos, o desencadeamento de processos corrosivos nas barras de armadura (2,4).

Os mecanismos de ataque dos agentes agressivos no concreto, isto é, dissolução e precipitação, são veiculados pela ação de um principal composto: a água. Dessa forma, a exposição do concreto à água é um fator agravante no que diz respeito a sua durabilidade. A água líquida, ao penetrar no material, carrega íons e gases dissolvidos que desencadeiam ou aceleram os processos de degradação. Além disso, devido ao elevado calor de evaporação da água, ela vaporiza de forma lenta em relação à taxa de sua penetração no concreto, mantendo o concreto úmido por maiores períodos do que os decorridos para a penetração. Além disso, os ciclos de penetração e evaporação do líquido podem resultar em variações volumétricas do concreto, que acarretam em rupturas de sua microestrutura, contribuindo para o aumento da porosidade, bem como para a perda de resistência mecânica outras propriedades físicas (1,4).

Face ao exposto, o teor de umidade do concreto, ou seja, a quantidade de água retida na sua estrutura porosa possui relação direta com a durabilidade das estruturas de concreto. Inclusive, o boletim 183 do *Comité Euro-International du Béton* (6) relaciona esse teor, denominado de umidade relativa efetiva do concreto, com processos de degradação tanto do concreto quanto da armadura, conforme ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Risco de degradação do concreto e da armadura em relação a diferentes faixas de umidade relativa efetiva do concreto (CEB 183, 2004).

Umidade relativa (UR) efetiva do concreto (%)	Processo de degradação			
	Carbonatação do concreto	Corrosão da armadura		Ataque químico do concreto
		Concreto carbonatado	Concreto contaminado com cloreto	
< 45 (UR muito baixa)	1	0	0	0
45 a 65 (UR baixa)	3	1	1	0
65 a 85 (UR média)	2	3	3	0
85 a 98 (UR alta)	1	2	3	1
< 98 (UR saturada)	0	1	1	3

Legenda: **0** = risco insignificante; **1** = risco baixo; **2** = risco médio; **3** = risco alto.

No caso da carbonatação, o risco de degradação aferido na Tabela 1 este é um fenômeno decorrente das reações químicas de compostos de cimento com o gás carbônico atmosférico (CO₂) que resulta na redução do pH do concreto e, conseqüentemente, no risco de corrosão da armadura quando a frente de carbonatação atinge a região de seu embutimento. Esse avanço ocorre com maior intensidade quando a UR se encontra entre 45 % e 65 % (Tabela 1), que deve manter a rede de poros preenchida parcialmente.

Nessa condição, é facilitada tanto a penetração do CO₂ como a sua dissolução e difusão na solução intersticial. Hansson et al. (7) descrevem a carbonatação do concreto como evento de grande impacto na vida útil de estruturas edificadas em locais de clima quente em que há ciclos de molhagem e secagem: períodos de intensa insolação seguidos de períodos de intensa

exposição à água pluvial. Considerando que o concreto umidifica-se mais rapidamente do que perde água, o teor médio de UR interna do concreto tende a ser maior que o teor médio de UR atmosférica (6).

No caso do ataque químico, o risco de degradação aferido na Tabela 1, é decorrente da lixiviação dos compostos hidratados da pasta de cimento e de reações de redução do seu pH e/ou de expansão com tendência à fissuração do concreto, o que envolve, também, risco de corrosão da armadura. O ataque deve ser maior quando a umidade do concreto é elevada (> 98 %), condição em que os poros do concreto estão quase totalmente preenchidos com solução aquosa, o que é propício à difusão de agentes agressivos. Yates (8) descreve que, em ambientes naturais (não industriais), a degradação dos materiais de construção por agentes químicos é geralmente lenta e, como resultado, a vida útil deve exceder o tempo necessário até que ocorra avanço significativo de manifestações patológicas resultantes do ataque.

No caso de processo corrosivo (Tabela 1), o risco é maior em concretos carbonatados com umidade interna entre 65 % e 85 %. Cita-se que teores mais elevados que 85 % são limitados em razão de modificação da estrutura do concreto pelas reações químicas da carbonatação, em destaque o refinamento dos poros e, conseqüentemente, a diminuição da permeabilidade. Para o caso de ataque de íons cloreto, o risco de processo corrosivo é maior para uma faixa mais ampla de umidade do concreto (65 % a 98 %). Destaca-se que teores elevados de umidade são usuais em concretos contaminados com íons cloreto, devendo ser considerada a característica hidrocópica destes íons, podendo manter a umidade interna do concreto maior que a UR externa, atmosférica (6). De qualquer forma, deve-se considerar que a taxa de corrosão da armadura é maior em teores elevados de umidade, sendo severa entre 90 % e 95 %, e pouco significativa entre 50 % e 60 % (6).

Técnicas de avaliação da umidade interna no concreto

Visto que a durabilidade das estruturas tem sido um tema recorrentemente discutido no cenário acadêmico e objeto de interesse em estudos diversos do segmento da construção civil, e dada à elevada onerosidade atribuída às atividades de recuperação das estruturas, as técnicas de determinação das características do concreto em campo (em estruturas já edificadas) têm sua importância cada vez mais evidenciada tanto no âmbito científico quanto mercadológico. Isso ocorre independente da disponibilidade de diversos ensaios que são comumente realizados em ambiente de laboratório e que fornecem informações relevantes no que diz respeito às propriedades físico-mecânicas e ao estado de conservação do material em campo.

No entanto, no que tange exclusivamente à durabilidade, são poucos os ensaios que contribuem do ponto de vista da avaliação da umidade interna do concreto, considerando a água como agente precursor dos processos de degradação, conforme evidenciado anteriormente. Ensaios como a determinação da massa específica, absorção de água e índice de vazios (MAV) (9), da absorção de água por capilaridade (10) e da penetração de água sob pressão (11) fornecem informações importantes a respeito da porosidade e da forma como a água penetra e se distribui na estrutura interna do concreto, no entanto, são exclusivos ao ambiente laboratorial e requerem a extração de testemunhos em campo de dimensões específicas, o que, muitas vezes, dificulta a avaliação do estado de conservação das estruturas, especialmente daquelas já debilitadas e/ou parte do patrimônio histórico.

Devido à necessidade de obter mais informações a respeito da qualidade do concreto, bem como a dificuldade de realizar extrações e coletas de amostras em estruturas oriundas de patrimônios históricos, ou consideravelmente debilitadas, ensaios não destrutivos, por meio de equipamentos portáteis como os de impacto, ultrassônicos, elétricos e emissores de micro-ondas, dentre outras categorias, têm sido recorrentemente utilizados, principalmente no cenário internacional, visando à avaliação do estado de conservação das estruturas e, conseqüentemente, à manutenção e/ou prolongamento da vida útil. Os métodos físicos, como dureza superficial, resistência à penetração e ao arrancamento, são alguns dos mais utilizados em campo, inclusive no cenário nacional, e permitem avaliar, de forma pouco onerosa e rápida, a homogeneidade do concreto e a evolução da resistência à compressão nas primeiras idades. Os métodos como de velocidade de onda e pulso ultrassônico, também fornecem informações a respeito da estrutura interna do concreto, no entanto, são ainda pouco utilizados em campo e não possibilitam a obtenção de informações significativamente conclusivas para um diagnóstico.

Um método que merece destaque é a da determinação da resistividade elétrica do concreto, o qual é comumente aplicado em campo na avaliação do risco de corrosão da armadura. Como a resistividade do concreto é dependente do seu grau de saturação, esse ensaio, também não destrutivo, representa uma medida indireta da umidade interna do material. Considera-se que o grau de saturação do concreto é o principal fator controlador da resistividade elétrica: o fluxo da corrente elétrica é maior quanto maior é o grau de saturação do compósito, ou seja, quanto menor é a sua resistividade elétrica (2).

Face ao exposto, observa-se que os procedimentos não destrutivos mais difundidos não contemplam métodos de avaliação da água no interior do concreto. No entanto, existem tecnologias para esse tipo de avaliação que recentemente vêm ganhando espaço no cenário internacional, como o uso de equipamentos baseados na emissão e recepção de micro-ondas, que são radiações eletromagnéticas não ionizantes.

No que diz respeito à técnica de emissão de micro-ondas, o processo é relativamente simples e rápido, o que possibilita a realização de leituras em campo de uma maneira prática e também facilita a elaboração de diagnóstico. A água livre retida na rede de poros do concreto possui elevada permissividade dielétrica. Desta forma, quando o equipamento é posicionado, emitem-se as micro-ondas, que são absorvidas pelas moléculas de água de forma eficiente (12). A absorção faz com que as ondas emitidas sejam atenuadas, fator que é minuciosamente captado pela célula de resposta no equipamento, desta forma, com base na leitura de resposta das micro-ondas emitidas, obtém-se o teor de umidade interna do material.

O Moist 210 B (13) é um exemplo de equipamento emissor de micro-ondas utilizado para determinação da umidade interna, não apenas no concreto, mas também em outros materiais, e possui dois sensores para sua utilização. O Sensor Moist R1 (14) determina a umidade da camada superficial do elemento de concreto na profundidade de 3 cm, enquanto que o Sensor Moist P (15) é utilizado para determinações da umidade na profundidade de 7 cm, o que o torna adequado para análise de elementos de concreto como vigas e pilares mais robustos. No Laboratório de Equipamentos Elétricos e Ópticos (LEO) do IPT, foi possível determinar a frequência de operação desse equipamento para a medida em três classes de concretos, sendo a primeira relativa a concretos muito porosos (massa específica equivalente a $0,40 \text{ g/cm}^3$), a

segunda para concretos entre 20 MPa e 25 MPa, e a terceira para concretos de 30 MPa a 37 MPa. A frequência de operação se revelou similar para os três concretos nos dois sensores, sendo equivalente a 2,36 GHz no sensor R1 e 2,49 GHz no sensor P. A Tabela 2 indica valores de referência característicos de diferentes materiais de construção civil obtidos nas condições “seco naturalmente” e “completamente saturado” com uso dos dois sensores. Como exemplo, verifica-se que para o material denominado Concreto C30/37 (30 MPa a 37 MPa e densidade de 2,27 g/cm³), os valores são de 1,8 % de água líquida (0,041 g) para a condição de material seco naturalmente e de 7,5 % (0,170 g) para a condição de material completamente saturado.

Tabela 2 - Valores de referência do teor de umidade de diferentes materiais obtidos com uso do equipamento Moist 210 B (13).

Tipo de material	Densidade (g/cm ³)	Material seco	Material saturado
		(% de água em massa, em relação à massa do material)	
Madeira de pinho	0,53	12,0	60,0
Piso de cimento	2,37	2,5	6,4
Rocha (arenito)	1,92	0,8	6,4
Tijolos	1,78	1,3	14,9
Tijolos antigos	1,25	2,00	25,0
Concreto poroso	0,40	4,80	75,4
Concreto C20/25	2,23	2,40	8,7
Concreto C30/37	2,27	1,80	7,5

Quanto à mencionada determinação da resistividade elétrica em concretos, tanto em campo quanto em laboratório, esta é realizada com base na técnica consagrada dos quatro pinos (*Wenner Method*), desenvolvida originalmente para determinação da resistividade em solos. A técnica consiste no simples posicionamento do equipamento sobre a superfície do material, sendo que quatro eletrodos, normalmente equidistantes entre um e outro, são responsáveis pela aplicação de determinado valor de corrente elétrica alternada (pinos externos) e pela medição da diferença de potencial estabelecida pelo campo elétrico gerado no concreto (pinos internos). A partir desses dados, é determinada a resistência elétrica da porção de concreto contido dentro de uma semiesfera de raio aproximadamente igual ao espaçamento entre os pinos, sendo o centro localizado no ponto médio entre os dois pinos internos.

O Resipod (16), é um equipamento que aplica essa técnica, tendo a possibilidade de configurar o espaçamento entre os pinos de aplicação de corrente e leitura de diferença de potencial, o que permite realizar a medição em diferentes profundidades. Além disso, o equipamento dispõe de duas placas metálicas de aço inoxidável que podem ser utilizadas para determinação da resistividade elétrica volumétrica em laboratório quando aplicadas em corpos de prova cilíndricos (dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura).

Dessa forma, o uso associado dos equipamentos Moist 210 B (teor de umidade) e Resipod (resistividade elétrica) pode ser uma alternativa adequada para a melhor avaliação da presença de água em elementos de concreto em estruturas aéreas, como também na melhor avaliação de

processos de degradação dessas estruturas. No entanto, o pouco conhecimento dessas técnicas não destrutivas e sua associação, considerando a variedade de concretos disponíveis em mercado (composições e materiais diferentes, etc) e as variadas condições de umidade relativa atmosférica às quais o material é exposto dificultam a aplicabilidade e o reconhecimento como técnicas adequadas para elaboração de diagnósticos confiáveis.

Proposta de programa experimental

Tendo em vista as informações levantadas no presente documento a respeito das características microestruturais do concreto, porosidade, presença de água na estrutura interna do material e sua relação com a durabilidade das estruturas, bem como as principais técnicas de determinação do teor de umidade interna do concreto, fica evidente a importância do maior conhecimento e aplicação de ensaio ENDS na avaliação em campo de parâmetros relacionados à avaliação do estado de conservação das estruturas.

Visando contribuir para esse conhecimento e aplicação de ensaio ENDS, propõe-se a realização de um estudo em escala laboratorial com o objetivo principal da avaliação da umidade interna do concreto por meio da aplicação de ENDS em associado com ensaios laboratoriais convencionais de caracterização do concreto, devidamente normalizados. Dessa forma, espera-se adquirir informações relevantes da aplicação desses ensaios e contribuir para a aplicabilidade em campo em futuras avaliações do estado de conservações das estruturas.

Para tanto, serão produzidos três concretos com diferentes composições, considerando as especificações para consumo de cimento e relação água/cimento de cada uma das classes de agressividade ambiental detalhadas na NBR 12655: 2015 (5). Dessa forma, os concretos a serem produzidos possuirão consumos de cimento e relações a/c de, respectivamente, 260 kg/m³ e 0,65 (classe I), 300 kg/m³ e 0,58 (valores intermediários entre a classe II e a classe III) e de 360 kg/m³ e 0,45 (classe IV). Esses materiais serão submetidos à cura úmida até os 28 dias de idade, sendo caracterizados pelos procedimentos convencionalmente empregados em laboratório para determinação das propriedades do concreto, tais como: massa específica, absorção de água, índice de vazios, resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água por capilaridade, dentre outros.

Após a realização dos ensaios convencionais de caracterização, parte dos corpos de prova será submetida ao processo de carbonatação em câmara climática em ambiente enriquecido com gás carbônico pelo método acelerado, conforme a parte 12 da ISO 1920 (17) até que a camada de carbonatação atinja a profundidade de 5 mm. Esse processo tem como objetivo gerar um lote de amostras carbonatadas que serão posteriormente comparadas com amostras não carbonatadas quando da realização dos ENDS destacados para o presente estudo. Desta forma, espera-se também poder comparar a eficiência dessas técnicas de determinação do teor de umidade interna frente ao processo de carbonatação, fenômeno inerente à maioria das estruturas de concreto pré-existentes.

Quando do fim do processo de carbonatação parcial das amostras de concreto, os corpos de prova serão acondicionados em um tanque de imersão em água (UR = 100 %) até que ocorra total saturação. As amostras serão pesadas periodicamente até a comprovação da estabilização da massa dos corpos de prova e, quando a mesma ocorrer, serão realizados os procedimentos de avaliação da umidade interna, isto é: ensaio END de determinação da resistividade elétrica

superficial e volumétrica (ambos se caracterizando como medidas indiretas da umidade interna) e cálculo do teor de umidade pela variação de massa (método gravimétrico) e pelo ensaio END de emissão de micro-ondas. Após a realização desses ensaios, as amostras serão acondicionadas em uma câmara climática com temperatura constante (20 °C) e umidade ambiente relativa de 95 %. Sendo comprovada a estabilização da massa das amostras na nova faixa de umidade, os ensaios serão realizados novamente, de forma que esse processo se repetirá em novas faixas de umidade, diminuídas gradativamente (75 % UR e 55 % UR). O objetivo principal dessa etapa de avaliação é simular as condições de umidade atmosférica às quais as estruturas de concreto são comumente expostas, de modo que seja possível constatar o comportamento dos concretos por meio dos ENDS em faixas de UR representativas. Após a avaliação da umidade interna na última faixa de umidade (55 % UR), as amostras de concreto serão secas em estufa (100 °C) por um período de 72 h. Após a secagem, os ensaios serão novamente repetidos.

Por fim, quando do tratamento estatístico e análise dos dados obtidos por meio dos ensaios realizados, espera-se poder comparar os concreto frente às variáveis apresentadas, isto é: concretos de diferentes composições, fenômeno da carbonatação e variações de umidade relativa ambiente. Por meio dessa comparação, espera-se que seja possível estabelecer parâmetros e premissas importantes para o emprego dos ensaios ENDS visando à avaliação da qualidade do concreto em estruturas pré-existentes no que diz respeito à durabilidade e integridade do compósito, procedimento que é mais frequentemente realizado no cenário internacional, dada ao emprego dos ENDS na avaliação da durabilidade e vida útil de estruturas.

Considerações

Ao analisar a bibliografia e as informações levantadas no que tange ao tema da durabilidade do concreto e da realização de ensaios ENDS na avaliação da sua umidade interna, cujo valor é referência para detecção do potencial de ocorrência de processos de degradação, foi possível realizar as seguintes conclusões:

- É importante a utilização de técnicas não destrutivas na avaliação do estado de conservação das estruturas, tendo em vista as diversas problemáticas relativas à realização de métodos convencionais de análise do concreto em campo, tais como dificuldades no processo de extração e na coleta de amostras em estruturas devido ao acesso e fragilidade da estrutura e, ainda, a própria restrição desses métodos na determinação de parâmetros relacionados à deterioração do concreto e da armadura, em destaque a umidade interna do concreto;
- Existe uma defasagem tecnológica no cenário nacional, tendo em vista a disseminação de diversas técnicas não destrutivas no externo, sendo estas aplicadas comumente na avaliação do estado de conservação das estruturas e seu monitoramento, bem como em estudos de novas tecnologias END;
- Com o surgimento constante de novas tecnologias END e aprimoramento de algumas já existentes, faz-se necessária a realização de estudos contínuos, incluindo a associação de técnicas, como é o caso do projeto de pesquisa proposto. Como

resultados, espera-se obter maior conhecimento das técnicas e o fornecimento de informações relevantes da operação dos equipamentos e aplicação prática de novos procedimentos de ensaios ENDS frente às adversidades do campo, tais como: concretos de composições diferentes; presença de fenômenos que modificam a estrutura do material tais como a carbonatação; e a variedade de condições atmosféricas às quais o concreto está exposto.

Desta forma, finalmente conclui-se que a presente proposta de estudo se apresenta como uma contribuição para a futura solução dessas problemáticas, visando à durabilidade das construções e aplicabilidade de técnicas de maior praticidade e eficiência na avaliação das estruturas.

Referências bibliográficas

- (1) MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2 ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk, IBRACON, 2014. 751 p.
- (2) ARAUJO, A; PANOSSIAN, Z. Resistividade elétrica do concreto na avaliação do risco de corrosão nas estruturas atmosféricas. **Techne: Revista de Tecnologia da Construção** (São Paulo). , v.21, p.66 - 68, 2013.
- (3) ESCADEILLAS, G.; HORNAIN, H.. **A durabilidade do concreto frente a ambientes quimicamente agressivos**. In: OLLIVIER, J.; VICHOT, A. Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. [s.l.]: Ibracon, 2014. Cap. 11. p. 249-324.
- (4) SATO, N. M. N., **Análise da porosidade e das propriedades de transporte de massa de concretos com vistas à avaliação de suas durabilidades**. 1998. 172 f. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1998.
- (5) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação**, Rio de Janeiro, 2015, 23 p.
- (6) COMITE EURO-INTERNATIONAL DE BÉTON (CEB). **Bulletin d'Information N° 183 (CEB 183): Durable concrete structures**. Telford, London, 1983. 112 p.
- (7) HANSSON, C.M.; POURSAEE, A. JAFFER, S.J. Corrosion of reinforcing bars in concrete. **The Masterbuilder**. v.106, p.106-125, 2012.
- (8) YATES, T. **Mechanisms of Air Pollution Damage to Brick, Concrete and Mortar** In: The Effects of Air Pollution on the Built Environment. Chapter 4. pp. 107-132.
- (9) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**, Rio de Janeiro, 2009, 4p.
- (10) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade**, Rio de Janeiro, 2012, 3p.
- (11) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **NBR 10787: Concreto endurecido – Determinação da penetração de água sob pressão**, Rio de Janeiro, 2011, 6p.
- (12) MAKUL, N.; SUA-IAM, G. **High performance microwave energy in cement and concrete**. Chapter 3, 2016. Disponível em: <<https://www.researchgate>.

-
- net/profile/Natt_Makul/publication/10991610High_Performance_Microwave_Energy_in_Cement_and_Concrete/links/583c10f208ae502a85e37efa/High-Performance-Microwave-Energy-in-Cement-and-Concrete.pdf>. Acessado em 02 de nov. 2017.
- (13) HF SENSOR. **Handheld microwave moisture measuring system; MOIST 210B**. Disponível em: <<http://www.hf-sensor.de/download/moist210beng.pdf>>. Acessado em: 01 nov. 2017a.
- (14) HF SENSOR. Microwave sensing head; MOIST R1. Disponível em: < <http://www.hf-sensor.de/download/moistr1eng.pdf> >. Acesso em: 01 nov. 2017b.
- (15) HF SENSOR Microwave sensing head; MOIST P. Disponível em: < <http://www.hf-sensor.de/download/moistpeng.pdf>>. Acessado em: 01 nov. 2017c.
- (16) PROCEQ. Resipod Family operating instructions. Disponível em: <https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Resipod%20Family_Operating%20Instructions_English_high.pdf> Acessado em: 09 nov. 2017.
- (17) INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), **ISO 1920-12**: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated method, Geneva, 2015, 12p.