

Adição de cal aos concretos com ar incorporado visando a redução da frente de carbonatação

Matheus Borges de Resende (1); Antônio de Paulo Peruzzi (2).

(1) Aluno de Graduação FECIV-UFU; (2) Professor Doutor FECIV-UFU.

Resumo - Os aditivos incorporadores de ar (IAr) são utilizados amplamente na construção civil, seja para controlar a ação deletéria do ciclo de gelo-degelo, em concretos auto-adensáveis e para alterar a sua massa específica, para obter uma estrutura mais econômica ou com melhor desempenho térmico. A incorporação se dá por meio de pequenas bolhas de ar esféricas, estáveis, e uniformemente distribuídas na pasta do concreto. A carbonatação é uma reação que ocorre a partir da penetração do gás carbônico (CO_2) nos poros do concreto, onde ele se dilui na umidade presente na estrutura formando ácido carbônico (H_2CO_3) e este ácido reage com os compostos da pasta de cimento - principalmente com o hidróxido de cálcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] - resultando em água e carbonato de cálcio (CaCO_3). O consumo do hidróxido de cálcio nesta reação resulta em um decréscimo no pH do concreto, que pode resultar na corrosão da armadura, devido à despassivação. O presente trabalho visa avaliar a viabilidade da adição de cal hidratada à formulação do concreto para que ela atue como produto de sacrifício, deixando livre a Portlandita produzida no processo de hidratação do cimento para garantir o pH alcalino responsável pela passivação da armadura.

Palavras-Chave: Concreto com ar incorporado, carbonatação, durabilidade.

Abstract - Air-entraining admixtures are widely used in civil construction, either to control the deleterious action of the freeze-thaw cycles, in self-compacting concretes or to change specific masses, in order to obtain a more economical structure with better thermal performance. The air entraining process generates small spherical air bubbles, stable, and uniformly distributed in the paste of the concrete. Carbonation is a reaction that occurs from the penetration of carbon dioxide (CO_2) into the pores of the concrete, where it diffuses into the moisture present in the structure forming carbonic acid (H_2CO_3). This acid reacts with the compounds of the cement paste - mainly with calcium hydroxide [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] - resulting in water and calcium carbonate (CaCO_3). The consumption of calcium hydroxide in this reaction results in a decrease in the pH of the concrete, which can result in corrosion of the reinforcement. The present work aims to evaluate the viability of the addition of hydrated lime [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] to the concrete formulation so that it acts as a sacrificial product, leaving free the Portlandite produced in the cement hydration process to guarantee the alkaline pH responsible for passivation of the steel reinforcement.

Keywords: Air entrained concrete, carbonation, durability.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais empregados na construção civil e sua enorme popularidade é devido a fatores como sua resistência a compressão, durabilidade e custo/benefício. Frequentemente é necessário alterar algumas propriedades dele para se adequar ao meio ou às condições as quais será exposto e essas modificações podem ser feitas por meio do uso de aditivos em sua mistura, incorporação de fibras, etc.

Aditivos são produtos que capazes de mudar as características do concreto, como tempo de pega (aceleração ou redução), consistência e consumo de água (com aditivos plastificantes e superplastificantes) e os aditivos incorporadores de ar, objeto do presente trabalho.

O uso mais comum dos concretos aerados na construção civil brasileira é no processo construtivo composto por paredes de concreto maciço moldadas in loco, cuja formulação prevê a incorporação de ar com a função de torná-lo mais leve, necessitando de uma estrutura menos dispendiosa e resultando em menor carga para a fundação. O seu uso nas construções deste tipo é justificado pelo ganho em escala, proporcionando assim um maior potencial de lucro com a mesma quantidade de mão de obra.

O concreto convencional sempre tem uma certa quantidade de ar introduzida durante a sua mistura e o seu transporte, mas, como a tensão superficial da água é elevada, as pequenas bolhas de ar ficam instáveis e agrupam-se para formar outras maiores, que saem no momento do lançamento e, principalmente, no adensamento (Agnisini, 1988). Por outro lado, os poros capilares são originários da evaporação da água de amassamento que não foi utilizada para reação química do cimento e eles, devido a sua conectividade, representam riscos à durabilidade do concreto armado. Já no concreto com ar incorporado, as bolhas desses concretos são adicionadas à sua composição intencionalmente pelo uso de um agente apropriado.

Nevile (1997) ressalta que esse ar é diferente daquele aprisionado acidentalmente durante a mistura ou pela evaporação da água, que são bolhas de grandes dimensões, pois as bolhas incorporadas por meio de aditivos têm a forma esférica, são estáveis, elásticas e têm uma distribuição típica com diâmetros compreendidos de 10µm a 500µm (0,01mm a 0,5mm). Essas características fazem com que elas

atuem como lubrificantes, trazendo uma melhoria na trabalhabilidade do concreto e, mais importante, não representam riscos à durabilidade por estarem isoladas entre si (Agnesini, 1988).

A carbonatação é um processo de reação do CO_2 , o anidrido carbônico, com produtos gerados após a hidratação do cimento, principalmente a Portlandita $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, principal composto responsável pela alta alcalinidade do concreto (pH em torno de 13) que garante a “passivação da armadura”. Assim, a reação resultante da carbonatação retira do concreto compostos básicos diminuindo o seu pH, comprometendo sua durabilidade. A reação mais simples e importante de carbonatação é a combinação da Portlandita (hidróxido de cálcio) produzido na hidratação do cimento que, ao entrar em contato com o CO_2 e a umidade do meio, reage formando o carbonato de cálcio (CaCO_3). Trata-se de uma reação lenta, mas constante, que começa do exterior do concreto e caminha para seu interior, com maior intensidade quanto maior for a porosidade e, em concreto de mediana qualidade observa-se que a velocidade da carbonatação varia entre 1mm e 3mm por ano. A velocidade do processo é função da difusão de CO_2 no concreto, umidade relativa, tempo, relação a/c, tipo de cimento, permeabilidade do concreto e cura. O grau de carbonatação máximo ocorre a uma umidade relativa de 60%, enquanto que em um ambiente seco ou saturado, a carbonatação é reduzida para 20% deste valor (LAPA, 2008). A temperatura do ambiente de ensaio, a cidade de Uberlândia-MG, varia de 20°C a 30°C, uma faixa de variação que não representa problema ao trabalho. Pelo fato da carbonatação ser um processo de reação lento, habitualmente usa-se a câmara de carbonatação acelerada em pesquisas, que consiste em expor os corpos de prova ao gás carbônico em elevada concentração, neste trabalho acima de 90%. Ressalte-se que ainda não existe um ensaio de carbonatação acelerada que seja normatizado pela ABNT, então as pesquisas sobre o assunto usam os métodos propostos por diversos autores ou baseadas em normas internacionais (RILEM, por exemplo, como neste trabalho). Um dos objetivos da presente pesquisa foi testar a hipótese de que, “pode-se adicionar cal hidratada $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ à formulação do concreto para que ela atue como produto de sacrifício, supondo que ela reaja com o CO_2 , deixando livre a Portlandita produzida no processo de hidratação do cimento para garantir o pH alcalino responsável pela passivação da armadura”.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O tipo de Cimento Portland escolhido foi o CPV-ARI, com massa específica $3,12\text{g/m}^3$ e F_{C28} 39MPa, segundo ABNT NBR 7215:1997; areia quartzosa média com massa específica $2,64\text{g/m}^3$ segundo ABNT NM 52:2009 e MF 1,70, segundo ABNT NBR 7217:1987 e brita 0 (basáltica), com massa específica no estado seco $2,68\text{g/cm}^3$ e massa unitária $1,54\text{g/cm}^3$, segundo ABNT NM 53:2009. A cal empregada foi do tipo CH-I. O aditivo incorporador de ar (Iar) escolhido foi o MicroAir FC, da Basf. A quantidade de aditivo utilizada foi de 0,5% sobre a massa do cimento.

2.2 Métodos

2.2.1 Formulação do Concreto

O traço do concreto utilizado para todas as amostras do presente trabalho foi 1:2:2:0,58 (cimento, areia média, brita, água/cimento), e 0,5% de Iar (sobre a massa de cimento). A quantidade de cal variou em 0%, 1%, 2% e 3% (também sobre a massa de cimento), para garantir que a relação a/c e o consumo de cimento fossem mantidos, descontada da massa de areia média.

2.2.2 Confeccção das Amostras

Foram confeccionados quatro diferentes tipos de concreto: CON0 (Referência - sem de adição de cal), CON1 (1% de adição de cal, substituindo a areia), CON2 (2% de adição de cal, substituindo a areia) e CON3 (3% de adição de cal, substituindo a areia). A Tabela 1 traz a quantidade de amostras utilizadas em cada tipo de ensaio realizado no estado fresco, com as respectivas normas de referência.

Tabela 1: Tipos de ensaios, normas de referência e número de amostras a serem estudadas

Ensaio	Norma de Referência	Número de amostras por traço
Consistência no abatimento no tronco de cone	NBR NM 67:1998 Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone	1
Massa específica no estado fresco e teor de ar incorporado	NBR 9833:2008 Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico	1

Fonte: Autor

A Tabela 2 traz a quantidade de amostras utilizadas em cada tipo de ensaio realizado no estado endurecido e as respectivas normas de referência.

Tabela 2: Tipos de ensaios, normas de referência e número de amostras a serem estudadas no estado endurecido

Ensaio	Norma de Referência	Número de amostras por traço
Compressão axial	NBR 5739:2007 Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos	4
Massa específica	NBR 9779:2005 Argamassa e concreto endurecidos -	3
Índice de vazios	Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	3
Absorção de água por imersão		3
Carbonatação Acelerada	RILEM CPC-18 - Measurement of hardened concrete carbonation depth (adaptada)	3

Fonte: Autor

Todos os concretos foram confeccionados na mesma betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 250 litros, seguindo o mesmo padrão de mistura: 1º) foram colocados parte de água e o cimento, misturados até a formação de uma pasta homogênea; 2º) foram adicionados o agregado graúdo e miúdo, e o restante da água, e 3º) procedeu-se a homogeneização total do concreto. No caso dos concretos que receberam adição de cal, esta foi adicionada somente após a mistura completa de todos os outros elementos, ou seja, a cal foi adicionada sobre o concreto de referência, em todos os casos. Uma vez obtidas as amostras de concreto acima, adicionou-se o aditivo lar e procedeu-se uma nova homogeneização em betoneira por 2 minutos. Destaque-se o controle de tempo de homogeneização após a adição do lar é um fator determinante para limitar a quantidade de ar incorporado e a coalescência entre as bolhas incorporadas.

2.2.3 Preparo da Câmara de Carbonatação

A câmara de carbonatação utilizada no presente trabalho pertence ao Laboratório de Materiais e Construção Civil da FECIV-UFU que foi construída em 2008 e tem dimensões de 100x60x65cm (comprimento x profundidade x altura) (Figura 1).

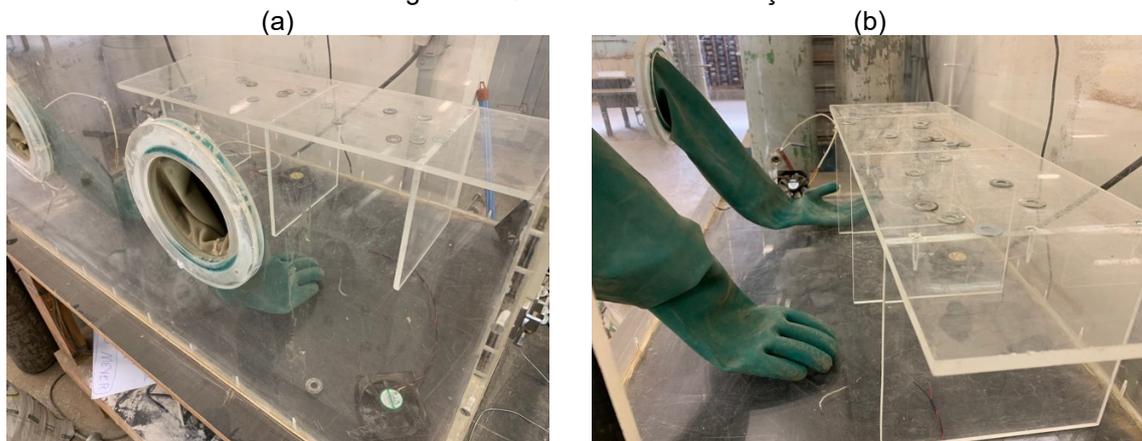
Figura 1 - Câmara de Carbonatação



Fonte: Maria Claudia (2008)

O presente trabalho teve início com a análise dos ensaios realizados por Maria Claudia (2008) usando esta câmara e os pontos críticos que puderam ser observados, a partir deles, dizem respeito ao posicionamento dos corpos de prova (CP) na câmara, o que causava “profundidades de carbonatação diferenciais”; à necessidade ou o correto posicionamento do sistema de ventilação, responsável pela uniformização da concentração de CO_2 ; e a posição do sensor de umidade dentro dela. Num primeiro momento, a câmara se encontrava desorganizada, com o sistema de ventilação inoperante, e a vedação comprometida, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Câmara de carbonatação



Fonte: Autor

Nela, haviam arruelas metálicas com a função de suporte para os corpos de prova, colocados verticalmente sobre elas. Esse método se mostrou inadequado, pois nos

trabalhos analisados, as medidas de profundidade de carbonatação das faces superior e inferior foram dispensadas devido à discrepância, as medidas da parte em contato com as arruelas se mostravam inferiores à face superior, que era livre. Então, a primeira mudança proposta foi a confecção de um novo suporte, no qual os corpos de prova seriam colocados horizontalmente e com o menor número de pontos de contato possível, garantindo a homogeneidade do CO₂ em contato com cada CP. A Figura 3 mostra o suporte pronto, feito em uma base de acrílico com trilhos de barra de aço 5mm, gerando dois pontos de contato por CP em toda sua extensão, e nenhum impedimento para a circulação do gás em toda sua área.

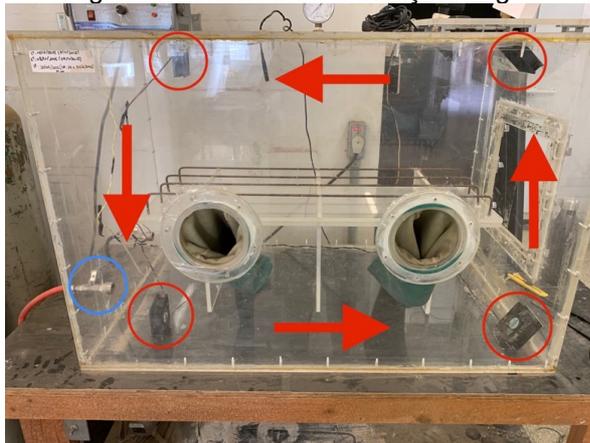
Figura 3 - Suporte dos corpos de prova



Fonte: Autor

O passo seguinte foi a reforma do sistema de circulação do gás, substituindo as ventoinhas que não tinham posicionamento fixo, reposicionando-as de forma a garantir a circulação do gás a toda a câmara, a partir do seu ponto de entrada. A Figura 4 demonstra em azul o ponto de entrada do dióxido de carbono (CO₂), em vermelho a nova posição das ventoinhas, e as setas demonstram o sentido de circulação do gás.

Figura 4 - Sistema de circulação de gás



Fonte: Autor

Foi necessária a instalação de uma nova fonte de alimentação elétrica, agora adequadamente dimensionada para o circuito e, também, instalou-se um interruptor ao sistema, afixado na câmara, mostrado na Figura 5.

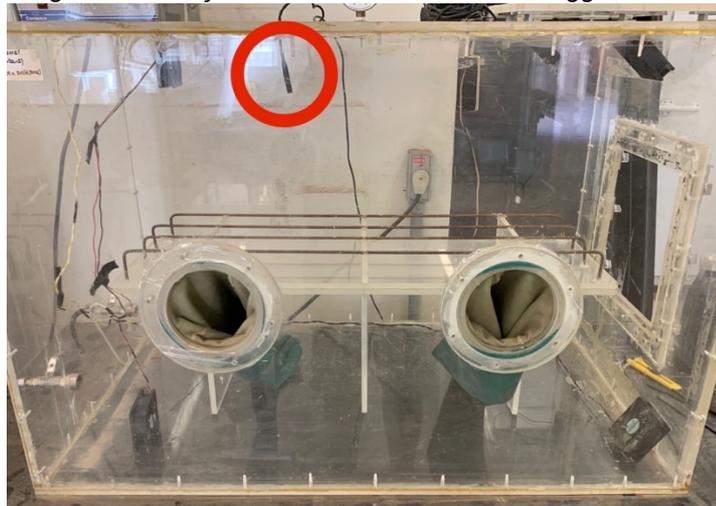
Figura 5 - Interruptor



Fonte: Autor

Como citado na introdução deste trabalho, a umidade é um fator de suma importância para a carbonatação, porém a câmara usada não possui nenhum controle dela. Assim, a umidade interna na câmara está diretamente ligada à umidade dos corpos de prova ao serem introduzidos para ensaio. A medição dessa variável foi realizada por meio de do aparelho Datalogger SH77X, que tem seu sensor instalado no interior da câmara, como assinalado na Figura 6.

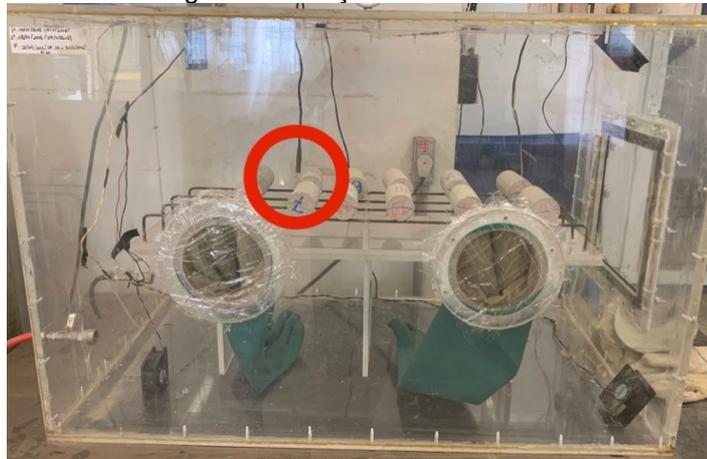
Figura 6 - Posição inicial do sensor do Datalogger SH77x



Fonte: Autor

Neste trabalho mudou-se a posição do sensor de umidade com o intuito de coletar dados mais precisos e reais devido a maior proximidade aos corpos de prova. A Figura 7 demonstra a nova localização, assinalada em vermelho.

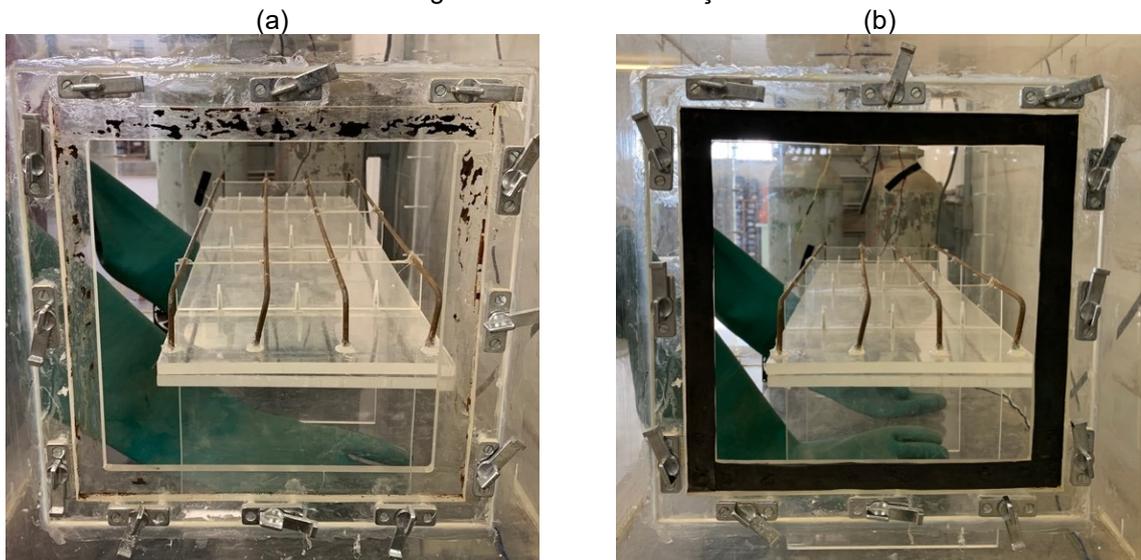
Figura 7 - Posição final do sensor



Fonte: Autor

Após todas as adaptações, a vedação da câmara foi refeita em todos os pontos necessários, como, por exemplo, na porta de acesso, como mostra a Figura 8 (a) e (b).

Figura 8 - Troca da vedação



Fonte: Autor

2.2.4 Parâmetros do Ensaio

Após os 7 dias na câmara os corpos de prova foram rompidos diametralmente, e a profundidade de carbonatação foi medida. No trabalho analisado anteriormente (Maria Claudia, 2008) os corpos de prova foram posicionados em seu interior de maneira aleatória, sem nenhum sentido de rompimento pré-determinado e no presente trabalho todos os corpos de prova receberam o desenho de uma linha guia, determinando um plano de corte, como mostrado na Figuras 9 (a) e (b).

Figura 9 - Linha guia e plano de corte

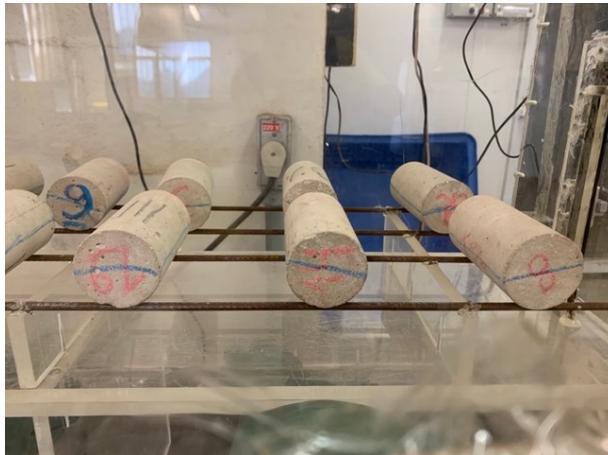


Fonte: Autor

Essa linha tem a função de padronizar o posicionamento dos corpos de prova dentro da câmara (Figura 10), resultando na igualdade do sentido de rompimento para todos

os CPs, implicando, teoricamente, em dados mais coesos sobre a profundidade de carbonatação.

Figura 10 - Posicionamento dos CPs na câmara de carbonatação



Fonte: Autor

Para garantir os parâmetros de umidade relativa (UR) no interior da câmara (neste trabalho buscou-se UR em torno de 60%) foi preciso desenvolver um método que garantisse que a umidade se mantivesse dentro desta faixa, pois, acima de 80% a reação de carbonatação é desprezível. Para tanto, estudou-se qual o teor de umidade que cada CP deveria entrar na câmara para que a UR na câmara gire em torno de 60%, usando um lote de corpos de prova similar aos que serão utilizados na análise da carbonatação como teste para “calibração” da câmara. Para tanto, seguindo a ABNT NBR 9778:2005 foram mensuradas as massas saturadas e secas desse lote de corpos de prova e estipulada a umidade de 50% para os corpos de prova no teste inicial. O cálculo desta umidade se da pela Equação (ii):

$$M_U = M_{sec} + \frac{(M_{sat} - M_{sec}) \times U}{100} \quad (ii)$$

onde:

M_U : massa na umidade desejada (g)

M_{sec} : massa seca (g)

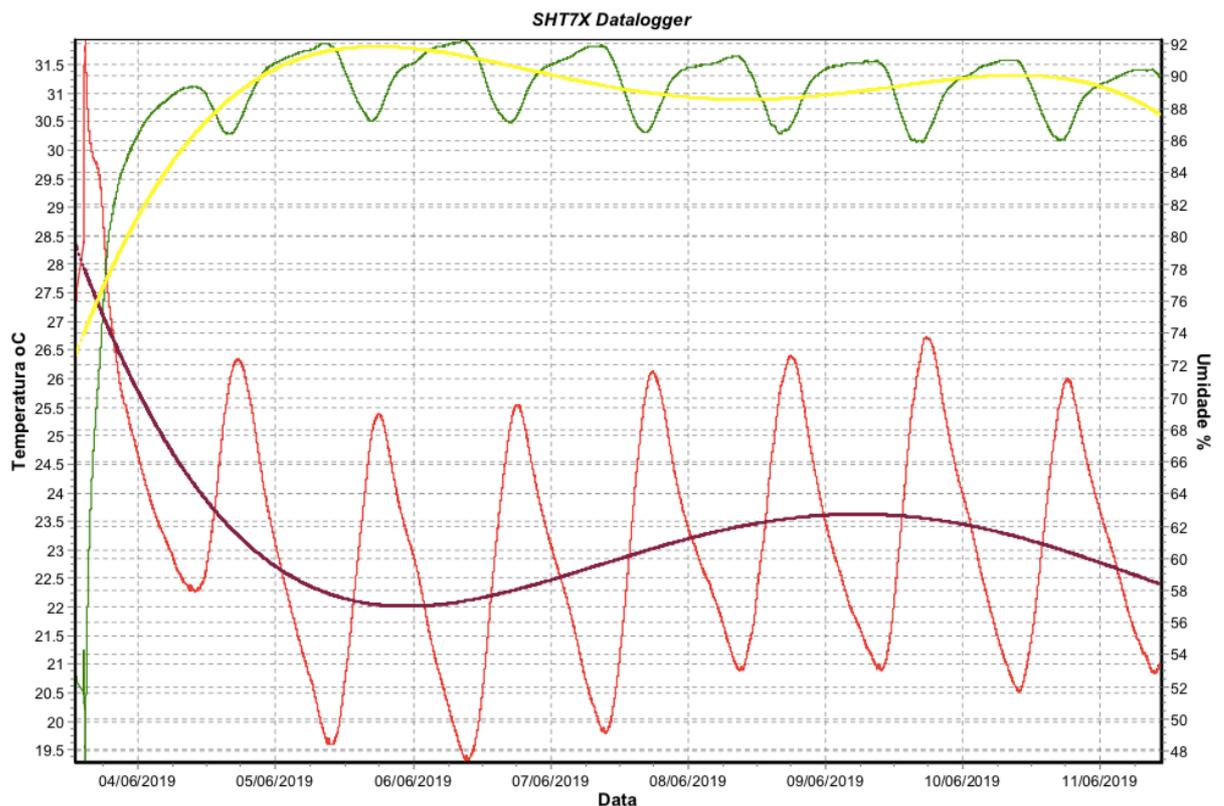
M_{sat} : massa saturada (g)

U: umidade desejada (%)

No teste inicial, o teor de umidade (TU) dos CPs, ao entrarem na câmara, girava em torno de 60% e, ao fim do período de sete dias, a UR na câmara chegou a 90%, como

demonstrado pela curva de cor verde no gráfico da Figura 11. Um segundo teste foi executado com novo com teor de umidade dos CPs em torno de 50%, obtendo UR média final na câmara de 80%. Com os resultados de ambos os testes observou-se que a relação TU x UR segue um padrão linear de aumento. Então, para a análise de carbonatação, adotou-se um TU médio de 35% para os CP's, obtendo UR ao fim do ensaio em torno de 70%. Este valor de 70% foi assumido como satisfatório.

Figura 11 - Dados exportados do Datalogger SH77X



Fonte: Autor

2.3.3 Medição da Frente de Carbonatação

O método utilizado para a medição começa com o rompimento diametral de todos os corpos de prova, seguindo o sentido pré-determinado pela linha guia, como mostrado na Figura 12.

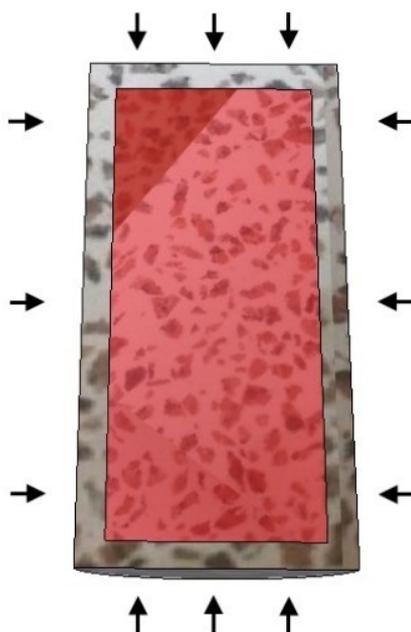
Figura 12 - Plano de rompimento da amostra



Fonte: Autor

Com o CP rompido é aspergida em ambas as faces geradas a solução de 1% fenolftaleína em 70% de álcool etílico, segundo RILEM CPC 18. A solução funciona como um indicador de pH que se mantém incolor em soluções ácidas e torna-se cor-de-rosa ou roxo em soluções básicas, ou seja, a parte carbonatada do concreto ficará incolor e a parte não carbonatada com tom cor-de-rosa. A RILEM CPC 18 estabelece que seja feita somente uma medida por lado, salvo exceções onde não se apresente uma linha constante de carbonatação. O presente trabalho adaptou a forma de medida para três medidas por lado: topo, base, lado esquerdo e direito, mostradas pelas setas de cor preta presentes na Figura 13.

Figura 13 - Esquema de medição da frente de carbonatação



Fonte: Autor

Nas faces superior e inferior (base e topo) uma medida foi feita no centro, e duas a 1cm das bordas. Nas faces laterais (lado direito e esquerdo) também foi feita uma medida central, e duas a 2cm das extremidades.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 engloba os resultados dos ensaios de massa específica, absorção de água, índice de vazios, resistência à compressão e eficiência.

Tabela 3: Resultados dos ensaios

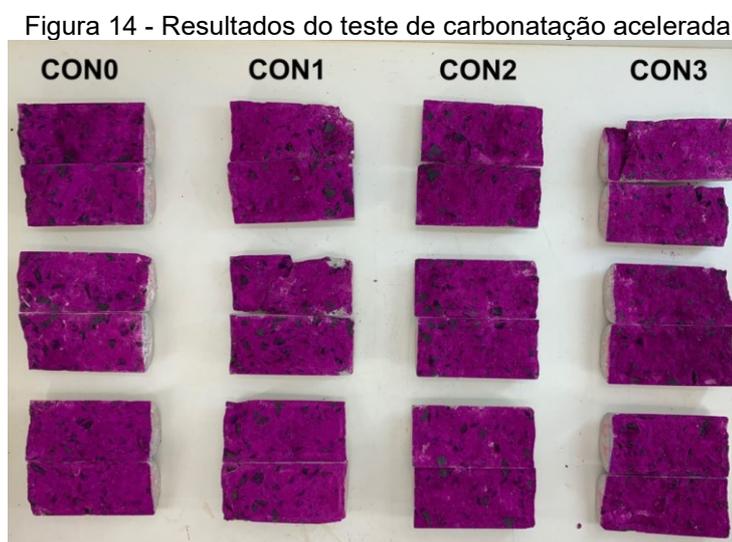
AMOSTRA	Massa Específica (g/cm ³)		Absorção (%)	Índice de Vazios (%)	Fck (Mpa)
	Fresco	Endurecido			
CON0	2,30	2,13	8,45	18,7	19,97
CON1	2,22	2,13	8,71	20,2	18,52
CON2	2,22	2,04	8,98	18,4	18,87
CON3	2,19	2,09	9,05	17,9	17,66

Fonte: Autor

A partir da Tabela 3 verifica-se que a adição de cal exerceu pouca influência sobre as propriedades mecânicas e físicas do concreto.

Para o ensaio de carbonatação acelerada os CPs foram inseridos na câmara com UR média de 35%. Ao fim do ensaio, a umidade média da câmara, de acordo com os dados do Datalogger SH77X ficou em torno de 67%, provando a linearidade do aumento dessa variável.

Uma vez ensaiados à compressão diametral e tendo suas faces aspergidas pela solução de fenolftaleína, obteve-se os resultados de carbonatação tal como visto na Figura 14,



Fonte: Autor

Pela análise dos CPs demonstrados na Figura 14, foi possível notar que não houve nenhuma frente de carbonatação nas amostras. A uma primeira vista, poder-se-ia correlacionar esse resultado à efetividade da ação da cal quanto ao controle da frente de carbonatação, porém, o mesmo resultado pode ser observado para amostra CON0, que não tem cal em sua composição. Por isso, os resultados passam a ficar sob suspeita: 1º) a não carbonatação teria sido resultado da UR ter girado em torno de 70%, que foi adotado como satisfatório neste trabalho, mas não é adequado? 2º) a falta de sensor de concentração de CO₂, teria sido um fator de descontrole e essa concentração desejada não foi efetiva, ou seja, não houve a saturação da câmara? Uma terceira hipótese, diz respeito ao tempo de exposição adotado (7 dias) não ser suficiente. Para tanto, como continuidade deste trabalho, deseja-se expor um novo lote de amostras por 14 dias.

4 CONCLUSÃO

Por meio do presente trabalho foi possível avaliar os novos parâmetros desenvolvidos na metodologia do ensaio de carbonatação acelerada, efetivos para o controle da umidade relativa dentro da câmara e para a obtenção de dados mais coesos sobre a carbonatação das amostras. Porém, os resultados acerca da eficiência da adição de cal hidratada à formulação do concreto se mostraram inconclusivos, podendo estar relacionados a UR dentro da câmara, à ausência de um sensor para a medida da concentração de CO₂, ou ao tempo de exposição adotado. Trabalhos futuros com alterações nesses parâmetros e modificações na câmara serão necessários para a completo entendimento das causas que levaram à não formação da frente de carbonatação nas amostras, e à solução do problema.

5 REFERÊNCIAS

- AGNESINI, M. V. C. **Concretos com ar incorporado: efeitos produzidos pela incorporação de ar sobre as propriedades dos concretos dosados com agregados usualmente empregados na região de São Carlos**. Notas de aula. EESC-USP. 1988
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: **Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. NBR NM 53: **Agregado graúdo: Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. NBR NM 67: **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, Brasil, 1998

_____. NBR 5739: **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, Brasil, 1994.

_____. NBR 7215: **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1997.

_____. NBR 7217: **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. Rio de Janeiro 1987.

_____. NBR 9833: **Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 9779: **Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação Da Absorção de Água Por Capilaridade**. Rio de Janeiro, 2005.

LAPA, J.S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. Belo horizonte, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Pini. São Paulo 1997.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**, 2a Edição. Bookman.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX.

CPC-18: **Measurement of hardened concrete carbonation depth**. RILEM Recommendations CPC-18. Materials and Structures, [s. n.], p. 453-455, 1988.

SALOMÃO, M. C. F. **Ensaio acelerado de carbonatação do concreto**. XII Seminário de Iniciação Científica. Uberlândia, 2008.