



## VARIABILIDADE DA PROFUNDIDADE CARBONATADA COM O TIPO DE CIMENTO, O FATOR ÁGUA/CIMENTO E O TIPO DE CURA

### VARIATION OF CARBONATED DEPTH WITH CEMENT TYPE, WATER / CEMENT RATIO AND KIND OF CURING

Maria de Lourdes Teixeira Moreira (1), Paulo de Tarso Cronemberger Mendes (1), Adriano Barreto Soares Barbosa (2), Alisson Rodrigues de Oliveira Dias (2), Beatriz Pires Gomes (2)

(1) *Professor Doutor, Departamento de Estruturas, Centro de Tecnologia, UFPI*

(2) *Estudante de Engenharia Civil, UFPI*

*Universidade Federal do Piauí, Campus Min. Petrônio Portela, Ininga, Teresina-PI; CEP:64049-300*

### Resumo

Visando contribuir para o conhecimento do comportamento do concreto em ambientes caracterizados por elevadas temperaturas, foi decidido estudar a influência de diferentes condições de cura sobre a carbonatação, tendo em vista ser esta uma causa importante da degradação das estruturas de concreto armado. Com esta finalidade, foi prevista a moldagem de 288 corpos-de-prova cilíndricos de concreto de dimensões 15 cm x 30 cm. Os corpos-de-prova foram moldados em quatro etapas, assim caracterizadas: 144 corpos-de-prova com concreto fabricado com cimento CP-IV 32, sendo 72 com fator água/cimento 0,48 e 72 com fator água/cimento 0,55. Outros 144 corpos-de-prova foram moldados com concreto fabricado com cimento CP-II-F 32, sendo 72 com fator água/cimento 0,48 e 72 com fator água/cimento 0,55. Cada conjunto de corpos-de-prova foi dividido em quatro grupos de 18, sendo cada grupo submetido a diferentes condições de cura: um grupo foi submetido à cura úmida por imersão, em outro não foi realizada cura e dois grupos foram submetidos à cura por molhagem duas vezes por dia, sendo a cura realizada em um dos grupos durante 3 (três) dias e no outro durante 7 (sete) dias. Os corpos-de-prova não submetidos à cura úmida ficaram expostos em ambiente externo, simulando as condições reais do concreto nas obras. Os conjuntos de corpos-de-prova foram divididos em grupos para serem ensaiados aos 14, 28 e 91 dias de idade, para determinação da espessura média da camada carbonatada, identificada com o uso de solução de fenolftaleína a 1%. Este trabalho apresenta os resultados obtidos.

*Palavra-Chave: carbonatação, concreto, cura, condições ambientais severas*

### Abstract

To contribute to the knowledge of the behavior of concrete subjected to high temperatures was decided to study the influence of different curing conditions on the carbonation because it is a major cause of deterioration of reinforced concrete structures. For this purpose 288 concrete cylindrical samples of dimensions 15x30cm were molded. The specimens were molded into four stages corresponding to the following characteristics: 144 specimens with concrete made with CP-IV 32 cement, 72 of them with w/c ratio of 0.48 and 72 with w/c ratio of 0.55. Another 144 specimens were molded with concrete made with CP-II-F 32 cement, 72 of them with w/c ratio of 0.48 and 72 with w/c ratio of 0.55. Each set of cylindrical samples was divided into four groups of 18 specimens, each group being subjected to different curing conditions: one group was submitted to wet cure by immersion in water, one group was not subjected to any kind of curing and two groups were subjected to curing by spraying twice a day with a cure performed in a group during three (3) days and the other for 7 (seven) days. The specimens not submitted to moist curing were exposed to the external environment, simulating the actual conditions in constructions. The sets of specimens were divided into groups to be tested at 14, 28 and 91 days to determine the average layer-thickness carbonated identified using the reagent Phenolphthalein 1%. This paper presents the results obtained.

*Keywords: carbonation, concrete, curing, severe environment conditions*



## 1 Introdução

Entre as atividades desenvolvidas no canteiro de obras para garantir a qualidade do concreto, destaca-se a cura. O termo cura refere-se aos procedimentos adotados visando garantir a hidratação do cimento, consistindo no controle do tempo, temperatura e condições de umidade, após a colocação do concreto nas formas [3]. A cura tem os objetivos de impedir a perda precoce de umidade do concreto e controlar sua temperatura durante um período suficiente, para que ele atinja um nível de resistência desejado [3]. A perda de água do concreto, logo após o lançamento, dificulta a hidratação do cimento prejudicando seu ganho de resistência e criando, no interior da massa de concreto, vazios que irão diminuir sua durabilidade.

Segundo o Código Modelo de 1990 do CEB (MC-90) [2], a realização da cura visa fazer com que o concreto atinja as propriedades potenciais que dele são esperadas. Ela visa evitar a secagem prematura do concreto e garantir que a pasta de cimento permaneça com uma quantidade de água, em um período de tempo suficiente de forma a garantir que o concreto atinja um alto grau de hidratação, tanto no seu interior como nas suas camadas superficiais. Ainda segundo o MC-90/CEB, quando a cura é insuficiente o efeito sobre a resistência do concreto é pequeno, pois mesmo sem cura o interior da massa de concreto permanece bastante hidratado, entretanto, os prejuízos são elevados no que tange à durabilidade, pois esta é influenciada principalmente pelas propriedades das camadas superficiais do concreto. Ocorrendo a secagem prematura, as camadas superficiais resultam permeáveis e conseqüentemente com baixa resistência à penetração de agentes agressivos.

O tempo adequado de realização da cura depende de muitos fatores, destacando-se o tipo, a resistência e o teor de cimento, o fator água/cimento, a presença e o tipo de adições. Depende das dimensões dos elementos estruturais e das propriedades isolantes das formas. É importante lembrar a influência das condições ambientais a que estará exposta a estrutura: baixa umidade do ar, incidência de radiação solar e ventos de velocidades significativas aceleram a perda de água nas superfícies não protegidas. Nestas condições ambientais, para garantir a hidratação do cimento é necessário prolongar a cura que deverá ser tanto mais longa, quanto mais severas as condições ambientais.

Segundo a NBR 14931[1], a cura deve ser realizada até que o concreto atinja endurecimento satisfatório, visando evitar a perda de água pela superfície exposta, assegurar uma superfície com resistência adequada e a formação de uma capa superficial durável. Para elementos estruturais de superfície, a norma fixa que a cura deve ser realizada até que atinjam resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) igual ou maior que 15 MPa.

Dentre os principais métodos de cura é bastante utilizada a cura por molhagem. Os métodos em que ocorre a adição de água geralmente são mais efetivos que aqueles que



apenas impedem sua saída, devendo esta ser potável. Entretanto, a aspersão de água fria em uma superfície de concreto aquecida devido ao calor de hidratação ou às condições ambientais, pode provocar tensões térmicas importantes que levem à fissuração prematura do concreto.

Apesar da importância da cura, muitas vezes ela é negligenciada nas nossas obras, o que é altamente prejudicial à qualidade final do concreto. Elementos estruturais não submetidos à cura adequada são mais permeáveis, permitindo que o processo de carbonatação das camadas superficiais seja acelerado. O processo de carbonatação consiste na reação do gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) presente na atmosfera com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) presente no concreto, tanto na forma de cristais como dissolvido na água contida nos poros capilares. Esta reação dá origem ao carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) que é um sal, reduzindo o pH do concreto. O concreto, pelo seu pH elevado, inibe o processo de corrosão da armação, dando proteção química à mesma. Com a carbonatação e consequente redução do pH esta proteção cessa e são dadas as condições para o início do processo de corrosão da armação e consequente deterioração da estrutura.

## 2 Ensaios

Para avaliação da influência da cura sobre a durabilidade das estruturas de concreto armado, considerando o aspecto da carbonatação, foram moldados quatro tipos de concreto, dois com cimento CP IV 32 e fatores água/cimento de 0,48 e 0,55 e dois com cimento CP II-F 32 e fatores água/cimento de 0,48 e 0,55. Para cada tipo de concreto foram moldados de uma única betonada 72 corpos de prova cilíndricos de 15cmx30cm. Os corpos de prova foram moldados na divisão de pré-moldados da Construtora Sucesso S.A., que cedeu os materiais, equipamentos e mão de obra para realização dos mesmos. Foram vibrados simultaneamente com o uso de mesa vibratória, visando uniformizar a qualidade dos corpos de prova.

No dia seguinte à moldagem, os corpos de prova foram retirados dos moldes e transportados para o Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Piauí. Cada grupo de 72 corpos de prova foi subdividido em quatro grupos, que foram submetidos a processos de cura distintos: um grupo foi submetido à cura por imersão, outro foi submetido à cura por molhagem durante 7 (sete) dias, outro foi submetido à cura por molhagem durante 3 (três) dias e finalmente o último grupo não foi submetido a qualquer tipo de cura. Os corpos de prova não submetidos à cura por imersão foram colocados ao ar livre no pátio do Centro de Tecnologia, onde ficaram expostos a condições semelhantes àquelas a que são expostos os elementos estruturais nas obras. Cada grupo foi subdividido de forma a permitir a realização de ensaios com diferentes idades (14, 28 e 91 dias de idade). Nestas ocasiões, estes corpos-de-prova foram rompidos de forma a determinar as resistências e foram medidas as profundidades médias de carbonatação, que foram evidenciadas com a utilização de uma solução de fenolftaleína a 1% em meio alcoólico.

Cabe observar que, de acordo com o proposto pelo MC-90, e considerando o tipo de cimento utilizado e as condições ambientais a que foram expostos os concretos, com exposição à radiação solar, temperaturas médias entre 27 e 28°C e umidades ambientes nos primeiros 14 dias de idade entre 72 e 74%, o tempo de cura ideal deveria estar entre 4 e 6 dias.

## 2.1 Resultados obtidos com cimento CP-IV 32 e fator água/cimento de 0,48

A figura 1 apresenta os valores médios das espessuras carbonatadas nos corpos de prova executados com cimento CP-IV 32 e fator água/cimento de 0,48, submetidos a diferentes condições de cura, medidos aos 14 dias, 28 dias e 91 dias. A figura 2 apresenta a resistência média obtida para os mesmos corpos de prova. Pode-se observar que a frente de carbonatação cresce rapidamente no início e depois mais lentamente. O crescimento das espessuras entre 14 e 28 dias para os corpos de prova em que foi realizada a cura foi inferior a 20%, chegando a 52% nos corpos de prova apenas expostos ao ar. Entre 28 e 91 dias o crescimento da espessura carbonatada foi inferior a 25%. Surpreende apenas que os corpos de prova submetidos a cura durante 7 dias apresentaram ao final de 91 dias a maior espessura carbonatada, apesar de, neste caso, apresentarem também a maior resistência média, como se pode ver na figura 2.

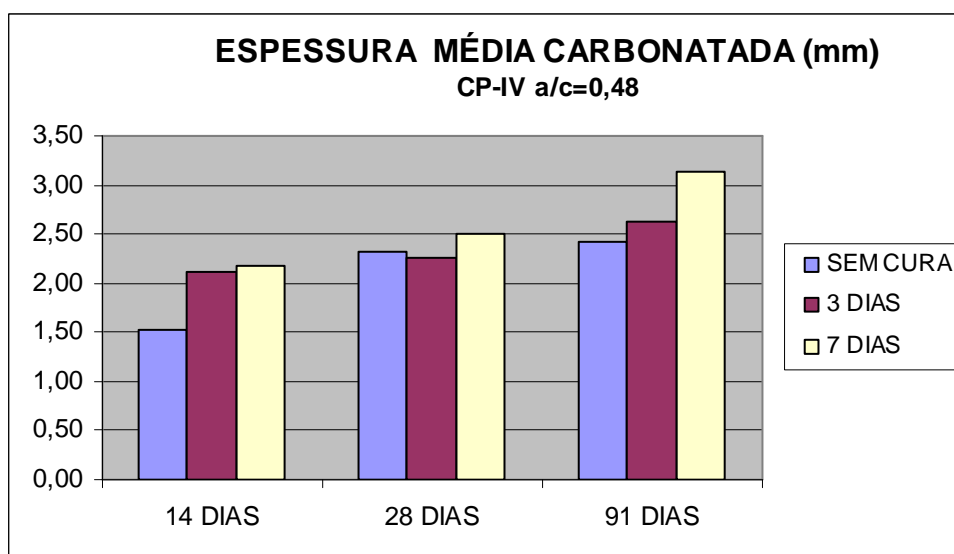


Figura 1 – Espessura média da camada superficial carbonatada para concreto com CP-IV 32 e a/c de 0,48

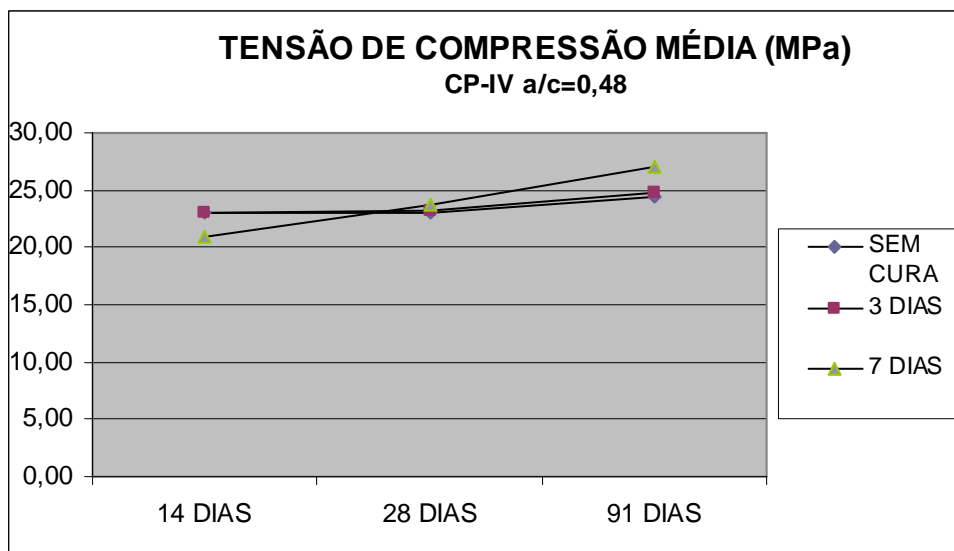


Figura 2 – Tensão de compressão média para concreto com CP-IV 32 e a/c de 0,48

## 2.2 Resultados obtidos com cimento CP-IV 32 e fator água/cimento de 0,55

A figura 3 apresenta os valores médios das espessuras carbonatadas nos corpos de prova executados com cimento CP-IV 32 e fator água/cimento de 0,55, submetidos a diferentes condições de cura, medidos aos 14 dias, 28 dias e 91 dias. A figura 4 apresenta a resistência média obtida para os mesmos corpos de prova. Como no concreto com fator água/cimento de 0,48, aqui também o crescimento da frente de carbonatação foi mais rápido nos primeiros dias. Neste caso, entretanto, o crescimento entre 14 e 28 dias, das espessuras carbonatadas nos corpos de prova molhados por 7 dias e nos corpos de prova apenas expostos ao ar foi semelhante, sendo superiores a 70%, enquanto que nos corpos de prova curados por apenas 3 dias, a evolução da espessura carbonatada ficou em 55%. Entre 28 e 91 dias o crescimento da espessura carbonatada nos corpos de prova molhados por 7 dias e naqueles apenas expostos ao ar foi inferior a 20%, enquanto chegou a 35% nos corpos de prova molhados por 3 dias. Neste caso, as resistências médias são maiores e tem evolução semelhante nos corpos de prova molhados por 7 dias e apenas expostos ao ar como pode ser visto na figura 4.

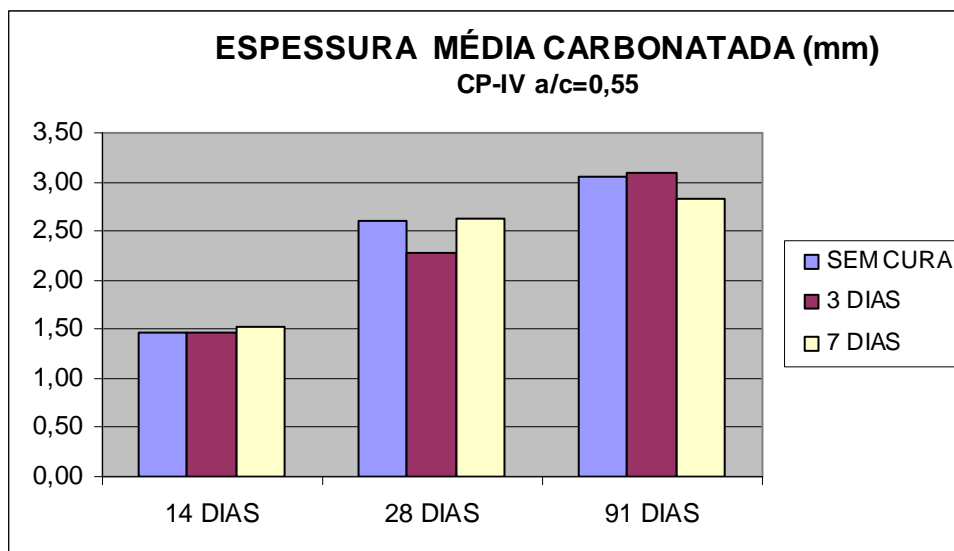


Figura 3 – Espessura média da camada superficial carbonatada para concreto com CP-IV 32 e a/c de 0,55

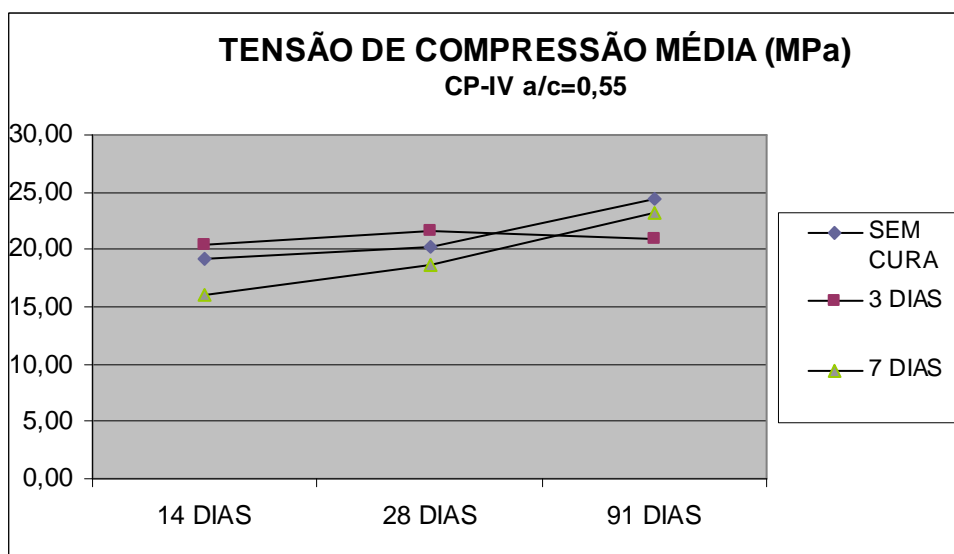


Figura 4 – Tensão de compressão média para concreto com CP-IV 32 e a/c de 0,55

### 2.3 Resultados obtidos com cimento CP-II-F 32 e fator água/cimento de 0,48

A figura 5 apresenta os valores médios das espessuras carbonatadas nos corpos de prova executados com concreto CP-II-F 32 e fator água/cimento de 0,48, submetidos a diferentes condições de cura, medidos aos 14 dias, 28 dias e 91 dias. A figura 6 apresenta a resistência média obtida para os mesmos corpos de prova. Neste caso o avanço da frente de carbonatação permaneceu significativo nos primeiros 28 dias de idade dos concretos, chegando aos 28 dias a ser quase o dobro da espessura aos 14 dias. No concreto exposto ao ar a espessura carbonatada cresceu 66%, no concreto

submetido a cura durante 3 dias cresceu 89%, crescendo menos apenas nos corpos de prova submetidos a cura durante 7 dias, que cresceu apenas 37%. Entre 28 e 91 dias os crescimentos das espessuras carbonatadas oscilaram entre 25% e 45%, mostrando redução da velocidade de avanço da frente de carbonatação. O comportamento das resistências dos três tipos de corpos de prova foi semelhante: as resistências médias crescem pouco entre 14 e 28 dias e sofrem um acréscimo maior entre 28 dias e 91 dias. Interessante observar que o concreto exposto ao ar foi o que apresentou maior resistência média e menor espessura carbonatada aos 91 dias de idade.

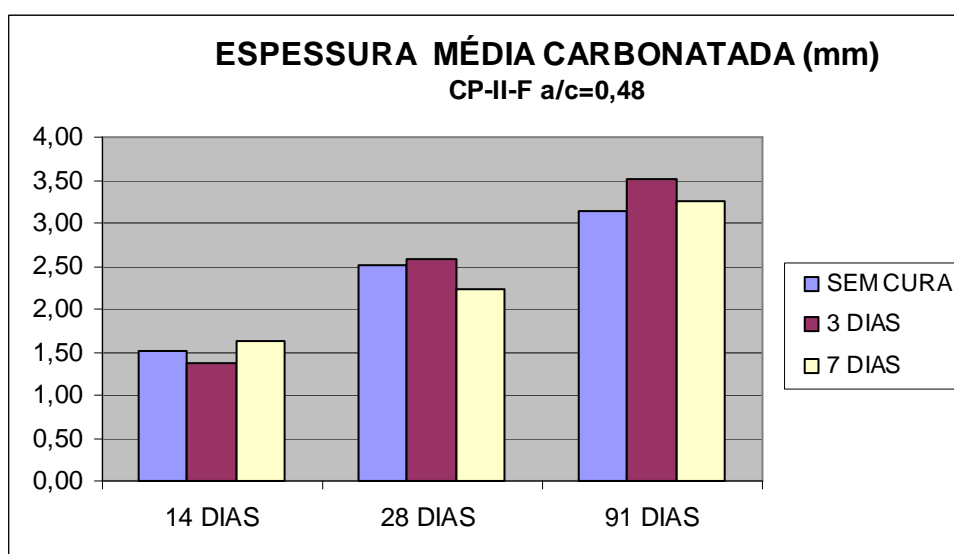


Figura 5 – Espessura média da camada superficial carbonatada para concreto com CP-II-F 32 e a/c de 0,48

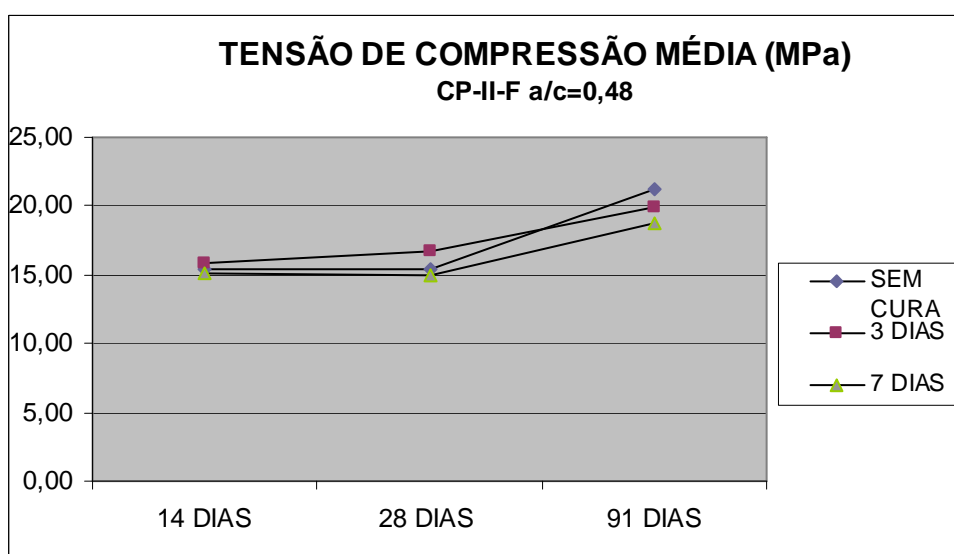


Figura 6 – Tensão de compressão média para concreto com CP-II-F 32 e a/c de 0,48

## 2.4 Resultados obtidos com cimento CP-II-F 32 e fator água/cimento de 0,55

A figura 7 apresenta os valores médios das espessuras carbonatadas nos corpos de prova executados com concreto CP-II-F 32 e fator água/cimento de 0,55, submetidos a diferentes condições de cura, medidos aos 14 dias, 28 dias e 91 dias. A figura 8 apresenta a resistência média obtida para os mesmos corpos de prova. Para este concreto é visível que a frente de carbonatação cresce mais rapidamente nas primeiras idades. O crescimento das espessuras entre 14 e 28 dias para os corpos de prova expostos ao ar e curados durante 7 dias aproxima-se de 50%, enquanto foi inferior a 25% nos corpos de prova curados por apenas 3 dias. Entre 28 e 91 dias o maior crescimento médio ocorreu nos corpos de prova molhados durante 3 dias, chegando a 49%, enquanto nos demais foi inferior a 40%. Em números absolutos, a menor espessura carbonatada foi registrada nos corpos de prova molhados durante 7 dias, em todas as idades. Como pode ser visto na figura 8, a maior resistência média em todas as idades foi apresentada pelos corpos de prova submetidos a molhagem durante 3 dias.

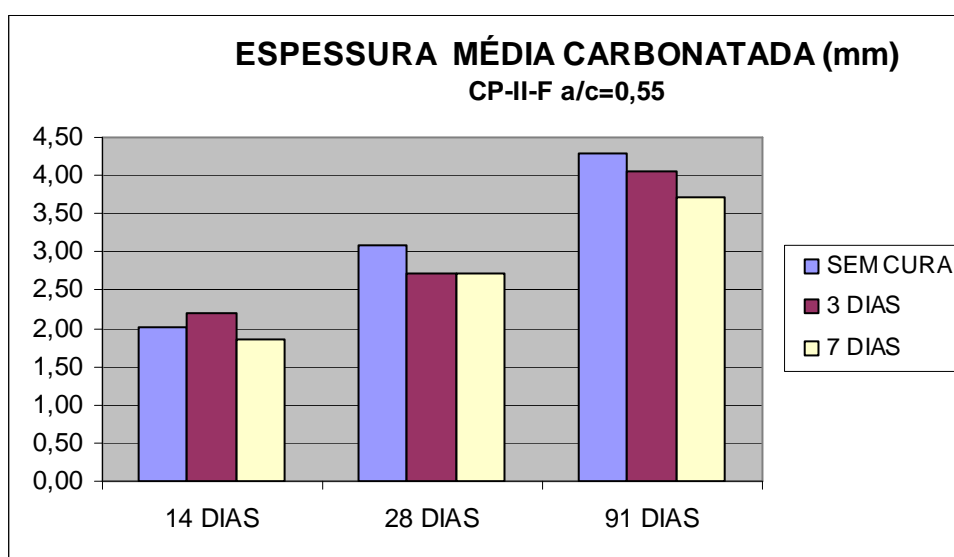


Figura 7 – Espessura média da camada superficial carbonatada para concreto com CP-II-F 32 e a/c de 0,55



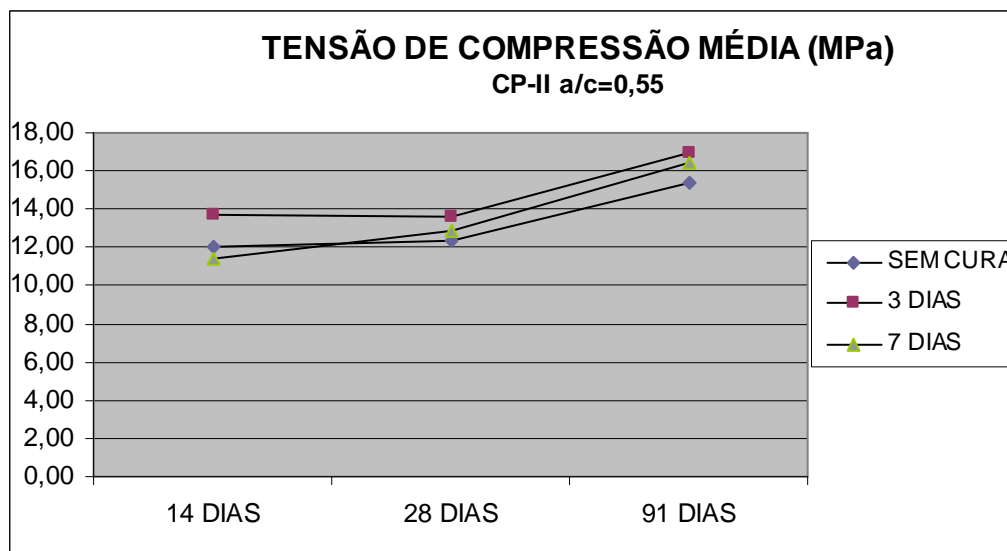


Figura 8 – Tensão de compressão média para concreto com CP-II-F 32 e a/c de 0,55

## 2.5 Comparação de resultados

A figura 9 mostra os resultados obtidos para todos os concretos ensaiados, permitindo comparar os resultados para os concretos produzidos, nas diferentes condições de cura realizadas.

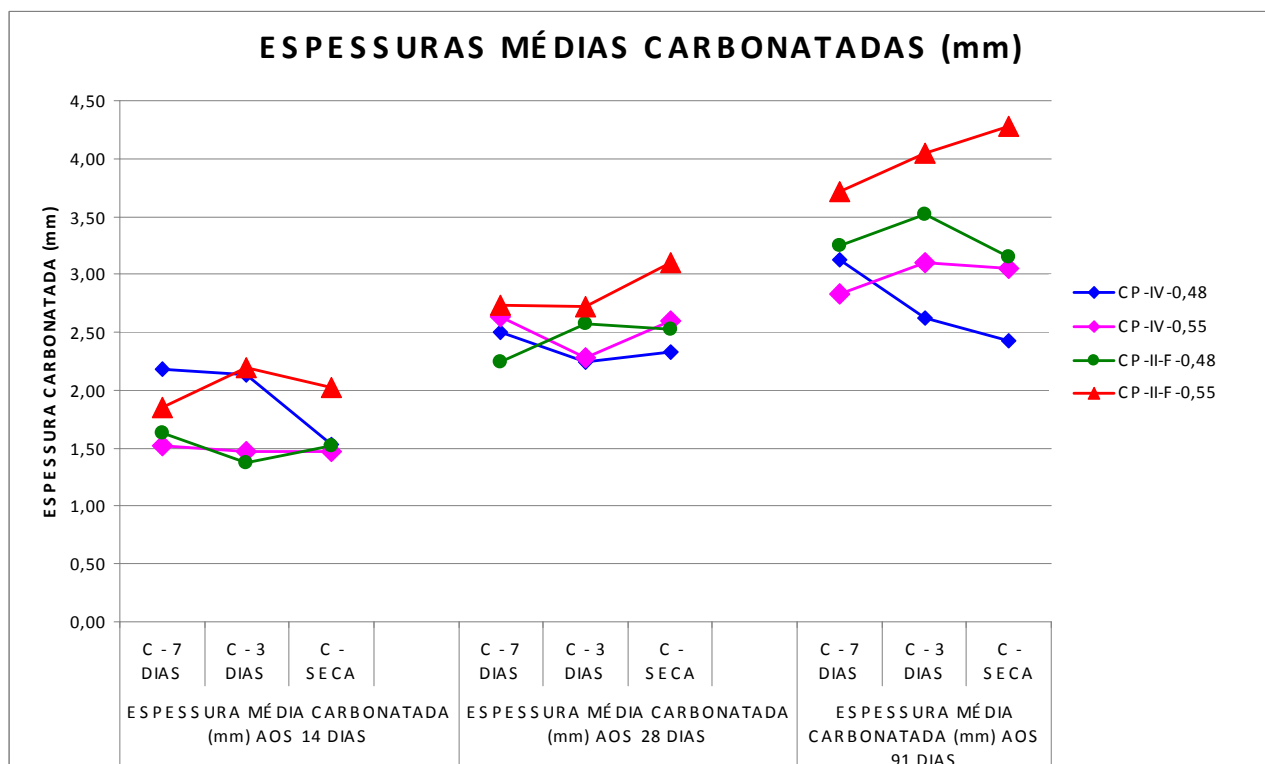


Figura 9 – Comparação de resultados para todos os concretos aos 14, 28 e 91 dias



A Figura 9 apresenta no eixo das ordenadas os valores médios das espessuras carbonatadas obtidas para os corpos de prova submetidos às diferentes situações de cura enquanto no eixo das abscissas são apresentadas três sequencias, referindo-se a primeira aos ensaios realizados aos 14 dias, a segunda aos ensaios realizados aos 28 dias e a terceira aos ensaios realizados aos 91 dias. Em cada data, são apresentados em sequencia os resultados relativos às condições de cura com molhagem por sete dias, por três dias e sem molhagem. Corpos de prova moldados com o mesmo concreto são identificados na figura pela mesma cor e os tipos diferentes de cura são identificados pelo texto no eixo das abscissas. Podemos observar que os máximos valores de espessura carbonatada ocorreram nos corpos de prova moldados com concreto de fator água/cimento de 0,55 com cimento CP-II-F 32.

Para os corpos de prova que tinham na composição do concreto o cimento CP-IV 32, não foi possível perceber influência do tipo de cura realizada. No concreto de fator água/cimento 0,48, aos 14, 28 e 91 dias, a maior espessura carbonatada foi apresentada pelos corpos de prova molhados durante 7 dias. No concreto de fator água/cimento 0,55, os corpos de prova molhados durante 7 dias apresentaram maior espessura carbonatada aos 14 dias, mas aos 91 dias a maior espessura carbonatada foi apresentada pelos corpos de prova molhados durante 3 dias.

Para os corpos de prova que tinham na composição do concreto o cimento CP-II-F 32 e fator água/cimento 0,55, aos 28 e aos 91 dias, a maior espessura carbonatada foi apresentada pelos corpos de prova secos ao ar, entretanto aos 14 dias, a maior espessura foi medida nos corpos de prova molhados durante 3 dias. No concreto com cimento CP-II-F 32 e fator água/cimento 0,48, os corpos de prova molhados durante 3 dias apresentaram maior espessura carbonatada aos 28 e 91 dias, sendo que aos 14 dias a maior espessura carbonatada foi apresentada pelos corpos de prova molhados durante 7 dias.

### 3 Conclusões

Para o concreto de maior resistência, com cimento CP-IV 32 e fator água/cimento de 0,48, a espessura carbonatada sofreu acréscimo inferior a 60% entre 14 dias e 91 dias, sendo máximo o acréscimo ocorrido nos corpos de prova submetidos à cura seca. Nos corpos de prova moldados com os demais concretos, o crescimento da espessura carbonatada oscilou em torno de 100%, entretanto, tal crescimento se deu em um intervalo de tempo muito superior, mostrando que a velocidade de penetração da frente de carbonatação tende a diminuir com a continuidade do processo.

Os corpos de prova executados com concreto de fator água/cimento 0,55 com cimento CP-II-F 32, aos 28 dias de idade ainda apresentavam resistência média inferior a 15 MPa, valor de resistência estabelecido pela NBR 14931 como necessário para que os procedimentos de cura sejam interrompidos. Ou seja, para estes corpos de prova a cura não poderia ter sido interrompida sequer aos sete dias de idade, como ocorreu no tipo mais prolongado de cura.



A partir dos resultados apresentados foi possível perceber que os concretos de menores resistências apresentaram maiores espessuras carbonatadas. Se aos 14 dias esta influência não é tão perceptível, ela apresenta-se mais visível aos 28 dias de idade e notável aos 91 dias.

Não foi observada diferença significativa entre as espessuras carbonatadas nos corpos de prova submetidos à molhagem duas vezes por dia durante sete dias ou três dias e os corpos de prova onde não foi adotado qualquer procedimento de cura. Desta forma, é possível concluir que, nas condições ambientais a que foram expostos os corpos de prova, a cura por simples molhagem não apresenta qualquer benefício no que tange à espessura carbonatada. Em vista disso, pretende-se realizar novos ensaios adotando outros processos de cura, que possam ser mais efetivos em regiões sujeitas a grande incidência de raios solares e que sejam facilmente executados em obras.

#### 4 Agradecimentos

Nossos agradecimentos à Construtora Sucesso S.A., nas pessoas do Engenheiro Carlos Augusto Daniel Junior e do técnico Carlos Alberto Marques Barbosa, pela doação do material, mão-de-obra e local para moldagem dos corpos de prova. Agradecimentos também à CAPES pelas bolsas do programa Jovens Talentos para a Ciência concedidas aos estudantes participantes deste trabalho.

#### 5 Referências

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931: Execução de estruturas de concreto** - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- [2] COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **CEB-FIP Model Code 1990**. London, Thomas Telford, 1993.
- [3] MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, Ibracon, 2008.