Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO MINERAL NA CARBONATAÇÃO UTILIZANDO MATERIAIS DE BELÉM

I. NAUAR DA SILVA
Acadêmica de Engenharia Civil & Monitora
da disciplina Materiais de Construção I & II.
Unama (Universidade da Amazônia)
Pará; Brasil.
Isabela_nauar2@hotmail.com

J. ZACARIAS RODRIGUES DA SILVA JR.
Diretor da Concreteste e Professor Titular.
Unama (Universidade da Amazônia)
Pará; Brasil.
concreteste@oi.com.br

RESUMO

Neste artigo, apresentam-se os efeitos da carbonatação nas estruturas de concreto armado sob o ponto de vista da durabilidade e consequentemente da vida útil, utilizando na composição das argamassas materiais específicos da região Norte, como sendo cimento NASSAU composto com pozolana e areia quartzosa. Aborda-se a influência das adições minerais neste fenômeno, discutindo seus mecanismos de atuação e os fatores intervenientes que contribuem para minoração do processo de carbonatação. Foram estudadas duas porcentagens de metacaulim em substituição, e através de ensaios realizados em laboratório são apresentadas as profundidades de carbonatação medidas através de um indicador químico de pH. Com a pesquisa realizada observou-se a influência marcante das adições minerais na melhoria das propriedades das argamassas e da redução da carbonatação. Este trabalho é uma contribuição ao meio técnico regional dado ser a Amazônia uma região de características atípicas do ponto de vista ambiental onde a umidade relativa é relevante.
Palavras-chave: concreto; adição mineral; carbonatação; ensaio acelerado.

ABSTRACT

This article presents the effects of carbonation on reinforced concrete using specific materials from the region of Northern Brazil. The primary focus is on the durability and, consequently, the life cycle, of the reinforced concrete. More specifically, the aforementioned specific materials are used for mortar's composition, just as the cement NASSAU is composed by pozzolan and quartz sand. Also addressed is the influence mineral addition has in this phenomenon, discussing its performing mechanisms and the intervening factors that contribute to the mitigation of the carbonation process. Two percentages of metakaolin substitution were studied in a laboratory and the findings of the carbonation intensity levels were deducted from these experiments. A chemical indicator of pH measurement was used for the procedures. Through the research performed it was noticed a strong influence and presence of minerals that enhance the properties of mortars and mitigate carbonation. This research is a contribution to the regional technical scenario, taking into account that, from an environmental perspective, the Amazon is a region with atypical characteristics where the relative air humidity is high and relevant.
Keywords: concrete; mineral addition; carbonation; accelerated tests.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

Devido às suas interações com o ambiente a qual estão expostas, as estruturas de concreto sofrem alterações que podem, com o passar do tempo, comprometer a sua estabilidade e sua funcionalidade [1].

A carbonatação é um fenômeno natural que ocorre todos os dias em milhares de estruturas de concreto armado do mundo inteiro. Trata-se de um processo químico, muito bem compreendido, aparentemente inofensivo, mas que avança lenta e progressivamente através da massa do concreto, a partir da superfície, assaltando as armaduras e causando a temida e dispendiosa corrosão eletroquímica [2].

A corrosão das armaduras aparece como a terceira manifestação patológica de maior incidência nas estruturas de concreto, conforme levantamento efetuado pelo GEHO (Grupo Español Del Hormigón) [2] em 52 províncias espanholas. Na análise de 844 casos, a corrosão foi a causa de 15% do total de manifestações patológicas encontradas, somente atrás das fissuras (62%) e das deformações excessivas (22%).

Em Belém, no Pará, a obra do Sambódromo do município foi diagnosticada com corrosão do tipo generalizada proveniente dos efeitos da carbonatação com tempo de vida útil de apenas 16 anos, 8 dos 18 pilares encontravam-se corroídos e com perda de seção superior a 15% do total de suas dimensões.

Destarte, fica evidente a relevância do tema para aumento da vida útil e, conseguintemente, da durabilidade das estruturas em concreto armado.

1.1 Objetivo

Analisar através de ensaio acelerado a espessura de carbonatação em argamassas utilizando materiais da região de Belém com diferentes porcentagens de adição mineral, neste caso o metacaulim. Observar a influência do mesmo neste processo físico-químico que tanto assola a região Norte, e que tem grande efeito deletério às estruturas de concreto armado haja vista o processo de carbonatação estar diretamente ligado à corrosão das armaduras tema não abordado neste artigo.
Como escopo, tem-se também, apresentar através de forma experimental resultados numéricos do ensaio acelerado de carbonatação, ensaio de absorção de água por capilaridade e as resistências à compressão e flexão em função das porcentagens de adição mineral utilizadas.

1.2 Justificativa

O estudo do processo de carbonatação é indispensável para o aumento da durabilidade das estruturas de concreto armado, pois essa manifestação é o mecanismo de disseminação da corrosão na região Norte. A Amazônia caracteriza-se por ter um clima além de quente muito úmido, que se torna um interveniente no desenvolvimento dessa manifestação.

2. CARBONATAÇÃO

2.1 Conceituação

A carbonatação é definida como reação de neutralização da água do poro, saturada de hidróxido de cálcio, e dos componentes alcalinos hidratados, contidos na matriz do concreto, sob a ação do anidro carbônico que, por ciclos de secagem e molhagem, precipitam o carbonato de cálcio [3]. Os principais constituintes na atmosfera que podem produzir reações de neutralização do concreto são o gás carbônico (CO_2), o dióxido de enxofre (SO_2) e o gás sulfídrico (H2S).
Tal fenômeno físico-químico que ocorre principalmente entre os hidratos do cimento e o CO_2 da atmosfera, reduz a alcalinidade do concreto, fazendo o ph da solução dos poros passar de valores em tono de 14, para valores na faixa de 9 [4].
A carbonatação melhora a qualidade do concreto, mas o problema está na corrosão das armaduras por conta da redução do ph da solução intersticial [5].

3. MANIFESTAÇÃO DE DANO

Observando-se algumas obras na região de Belém, constatou-se a presença da manifestação patológica da corrosão do aço da estrutura motivada pela carbonatação do concreto em consequência da elevada umidade da região. Este fato é

comprovado pela inspeção realizada na estrutura do Sambódromo, no estádio Evandro Almeida (Baenão) e o ainda já recuperado estádio Olímpico do Pará (Mangueirão). Isto tudo poderia ser modificado se na concepção e execução do projeto fossem adotadas medidas profiláticas contra corrosão como sendo a aplicação do concreto de elevado desempenho.

3.1 Mecanismos de Carbonatação

A carbonatação é um fenômeno cuja reação principal acontece entre o hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$ liberado pela hidratação do cimento Portland e o CO_2 do ar diluído na fase aquosa dos poros do concreto [6]. O CO_2 penetra nos poros do concreto, dilui-se na umidade presente na estrutura e forma o composto chamado ácido carbônico (H_2CO_3). Esse ácido reage com alguns componentes da pasta de cimento hidratada e resulta em água e carbonato de cálcio ($CaCO_3$). O carbonato de cálcio não deteriora o concreto, porém, durante a sua formação, consome os álcalis da pasta (CH e C-S-H) e reduz o ph [1].
De acordo com Ollivier [5], os mecanismos de carbonatação são descritos quimicamente conforme as equações:

1) Dissolução do CO_2 na água:

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \quad (1)$$

$$H_2CO_3 + H_2O \leftrightarrow HCO_3^- + H_3O^+ \quad (2)$$

$$HCO_3^- + H_2O \leftrightarrow CO_3^{2-} + H_3O^+ \quad (3)$$

2) Reação do ácido carbônico com a portlandita, após a dissolução da portlandita:

$$H_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O \quad (4)$$

Diminuição do pH da solução intersticial, (originalmente compreendida entre 12,5 e 13,5) por liberação de íons H_3O^+, para valores em torno de 9 [5].

3) A Carbonatação altera os hidratos da pasta de cimento endurecido (silicatos e aluminatos). No caso do C-S-H, ele pode evoluir para um gel de sílica:

$$H_2CO_3 + CaO.SiO_2.nH_2O \rightarrow CaCO_3 + SiO_2.nH_2 0 + H_2O \quad (5)$$

Todas as reações de carbonatação ocorrem em presença de água ou umidade e de forma simplificada, a reação de carbonatação do hidróxido de cálcio pode ser descrita conforme a equação abaixo [4]:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (6)$$

A Figura 1 elucida o processo de carbonatação nas fases sólida, líquida e gasosa.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

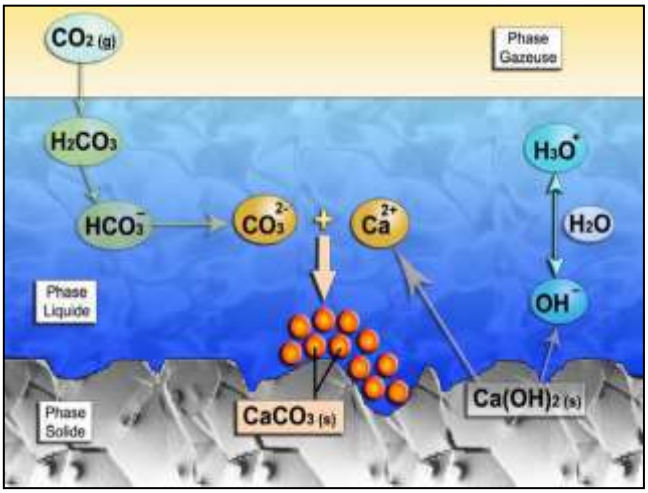

Figura 1 - Ilustração do processo de carbonatação do hidróxido de cálcio nas fases sólida, líquida e gasosa. (OLLIVIER. (2009)).

3.2 A influência da porosidade na carbonatação

O estudo da porosidade paralelamente ao estudo da carbonatação é importante, uma vez que os parâmetros que regem a difusão do CO_2 no concreto são a estrutura de poros na matriz e a umidade relativa dos poros [7].

Existe uma estreita relação entre porosidade e permeabilidade, estando à porosidade, por sua vez, relacionada ao empacotamento dos materiais que compõem a mistura — agregados, adições minerais e cimento —, e à reologia — relação a/c e aditivos — que melhorem a dispersão das partículas e favoreçam a homogeneidade da mistura [8].

"A permeabilidade é a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso" [9].

Para outros autores "a porosidade é a medida da proporção do volume total do concreto ocupada pelos poros, geralmente expressa em porcentagem" [10].

Para Huet [11], a porosidade do material de cimento é o volume dos poros acessível à água, com base no volume total do material.

Como já se sabe, a porosidade está diretamente ligada à relação a/c, sendo proporcional ao aumento desta relação, o que facilita o acesso do dióxido de carbono para o interior do material. O transporte de substâncias dissolvidas, líquidos em geral e de gases no interior do concreto, é decisivamente influenciado pela estrutura porosa da pasta de cimento endurecida. Desta forma, a interconexão dos poros, que determina a porosidade aberta, e a distribuição do tamanho de poros, consituem-se fatores de suma importância [12]. A Figura 2 ilustra, esquematicamente, a estrutura de concreto e os possíveis caminhos formados em seu interior durante o processo de hidratação da pasta de cimento. O desempenho do concreto é altamente dependente da estrutura e da distribuição do tamanho de poros, em particular sua durabilidade e resistência à penetração de agentes agressivos, tais como íons cloreto [1]. Estes caminhos internos podem ser classificados em:

- Caminho condutivo contínuo (CCP), que permite a passagem de corrente elétrica.
- Caminho descontínuo (CDP) onde, devido à sua descontinuidade, não há passagem de corrente no interior do concreto.
- Caminho isolante (CIP) que, conforme a quantidade de água e os produtos de hidratação no interior dos poros do concreto pode ou não conduzir correntes.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

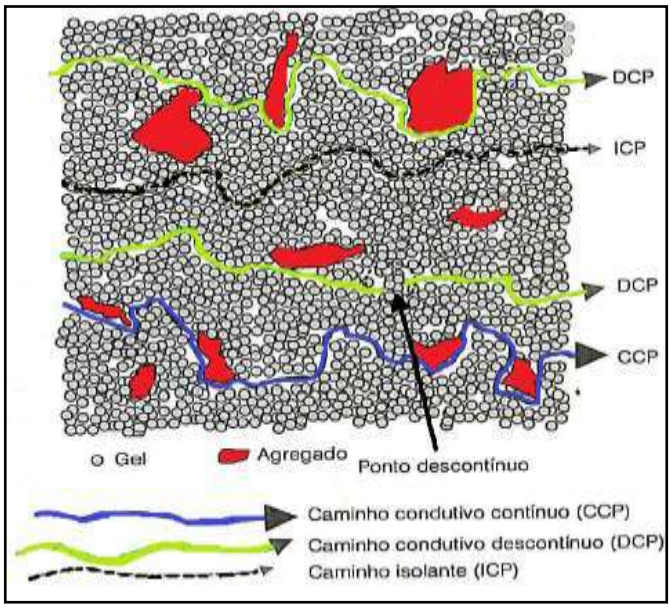

Figura 2 - Representação esquemática da estrutura de concreto (HELENE *et al*. (2014))

Outro fator que muito influencia no acesso do CO_2 ao interior do concreto é a permeabilidade, que depende da intercomunicabilidade entre os poros da matriz. Mesmo com uma porosidade alta, a permeabilidade do concreto pode ser baixa, se os poros forem descontínuos, dependendo da maior ou menor comunicação de poros capilares [10].

3.3 A influência da umidade do ar na carbonatação

A umidade relativa do ambiente exerce influência sobre a quantidade de água contida nos poros do concreto e esta, por sua vez, condiciona a velocidade de difusão do CO_2 nos espaços intersticiais através dos poros do concreto [13]. A água possui duplo papel: bloqueia os poros, dificultando a difusão de CO_2, porém, é também o meio de reação entre o CO_2 e o $Ca(OH)_2$ [10]. A representação esquemática da difusão de CO_2 nos poros do concreto é ilustrada conforme a Figura 3.

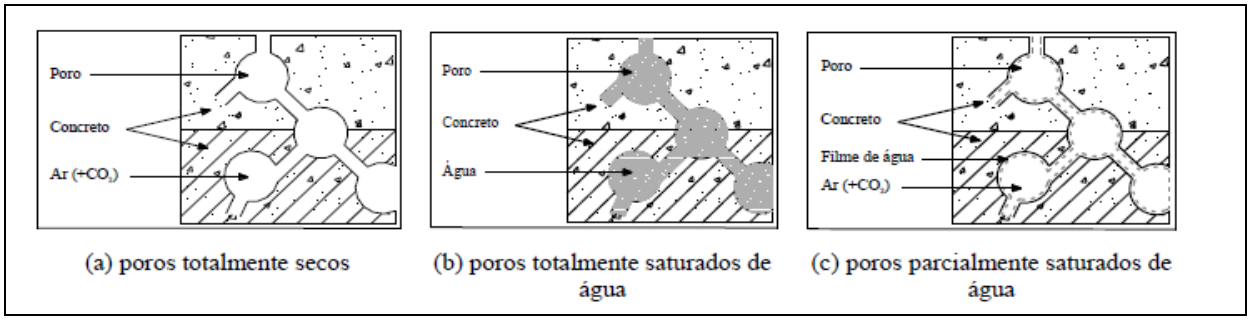

Figura 3 - Representação esquemática da difusão de CO_2 (BAKKER (1988) apud POSSAN (2010)).

Quando o concreto não apresenta água nos poros, Figura 03 (a), a difusão do CO_2 ocorre normalmente, porém ela permanece na forma de gás e não reage com os compostos do cimento hidratado. Já nos poros totalmente saturados, Figura 03 (b), a carbonatação praticamente não ocorre devido à reduzida taxa de difusão do CO_2 na água [15]. A difusão em meio aquoso é bem mais lenta do que a difusão no ar [7]. Porém, quando os poros estão parcialmente saturados , Figura 03 (c), a difusão do CO_2 é facilitada e com a água existente nos poros, se tem a condição mais favorável para o desenvolvimento das reações de carbonatação com os compostos da pasta de cimento hidratada e, portanto, a situação de maior risco para a despassivação da armadura [7]. A umidade ótima de avanço da frente de carbonatação se situa em torno dos 50 a 80% de umidade relativa [14]. “Em poros com umidade relativa baixa (≤50%) não existe eletrólito suficiente para que a reação de carbonatação ocorra” [7]. Em umidades maiores que 80% os poros estão saturados de água e o gás CO_2 penetra com mais dificuldade até a armadura, e em umidades inferiores, os poros estão quase secos e o CO_2 não pode reagir sem a existência de um meio líquido [14].

3.4 O efeito das adições minerais na prevenção da carbonatação

É sabido que a utilização das adições minerais promove diversas vantagens ao concreto, como redução da porosidade, da permeabilidade aos agentes agressivos, aumento da resistência à compressão , assim como, menor emissão de dióxido de carbono advinda da hidratação do cimento, haja vista que o consumo de cimento por m³ é reduzido [18]. Porém, quanto a seus efeitos no processo de carbonatação existem discussões doutrinárias entre alguns pesquisadores.
"As adições aumentam a resistência à compressão, reduzem a permeabilidade e a porosidade, o que é desejável: no entanto também podem aumentar a profundidade carbonatada do concreto" [15]. Helene [21] explica ainda que esta afirmação se dá através do conceito de reserva alcalina (ou teor de produtos carbonatáveis): à medida que há uma maior concentração de $Ca(OH)_2$ na solução intersticial do concreto, a carbonatação não ocorre com a mesma velocidade, pois o CO_2 que penetra necessita primeiro reduzir o pH e depois reagir com o $Ca(OH)_2$ presente, para então seguir precipitando $CaCO_3$. Portanto, se mantida a mesma relação água/cimento, cura e condições de exposição, concretos com elevados consumos de cimento (elevado teor de $Ca(OH)_2$ total) devem apresentar profundidades de carbonatação iguais a concretos com baixo consumo. O fator de controle é a concentração de $Ca(OH)_2$ nos poros, que depende exclusivamente do tipo de cimento, relação água/cimento e do grau de hidratação do cimento, não dependendo do consumo [15].
Schröder e Smolczyk (1969) apud Kulakowski [7], em estudo conduzido pelos autores foi observado que a velocidade de carbonatação, em concretos de cimento Portland com escória de alto forno, não é controlada pela alcalinidade total (ou reserva alcalina), mas sim pela porosidade que, segundo os autores é um fator decisivo na velocidade de carbonatação.
É em função do conceito de reserva alcalina que alguns autores, como Parrot (1966), Papadakis *et al*. (1992), Ho e Lewis (1987), Osborne (1986) apud Kulakowski [7] afirmam que concretos com adições pozolânicas apresentam profundidades de carbonatação superiores à profundidade de carbonatação obtida em concretos de cimento Portland comum, pois ocorre uma diminuição no teor de álcalis quando a sílica reage com o $Ca(OH)_2$ na reação pozolânica. Quando ocorre uma adição ou substituição de parte do agregado, a quantidade de C-S-H aumenta, porém a quantidade de $Ca(OH)_2$ diminui [10]. Essa redução final não aumenta a taxa de carbonatação porque é maior que o equivalente pelo aumento do conteúdo de C-S-H. A autora, afirma ainda que, "a concentração total de CaO nos constituintes carbonatáveis, haja vista que tem maior relevância do ponto de vista da carbonatação, aumenta significativamente com a substituição do agregado por pozolana" [10]. Destarte, essa reposição final é favorável na taxa de carbonatação (desacelerando), principalmente pela redução da porosidade.

3.5 As adições minerais para a vida útil e a durabilidade do concreto

Existe uma grande confusão ao se definir e distinguir os conceitos de durabilidade e vida útil, que são, muitas vezes, usados de forma inadequada e até como sinônimos [1], haja vista que os dois termos apresentam grande associação, muito embora tenham diferenças conceituais.
O comitê 201 do ACI [22] define durabilidade do concreto de cimento Portland como sua "capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração", com base nesta definição Mehta & Monteiro [16] afirmam que "o concreto durável conservará a sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao seu meio ambiente". Segundo esse autor, uma longa vida útil é sinônimo de durabilidade.
A ISO [17] define como vida útil "o período efetivo de tempo durante o qual uma estrutura ou qualquer de seus componentes satisfazem os requisitos de desempenho do projeto, sem ações imprevistas de manutenção ou reparo".
A utilização de adições minerais no concreto tem contribuído para dois requisitos destacados pelos pesquisadores na atualidade: "aumentar a durabilidade das estruturas e desenvolver materiais sustentáveis, o que torna o emprego das adições minerais uma tendência mundial" [18], assim como, diminuir a extração de matéria prima para a produção do cimento portland, reduzindo a emissão de gás carbônico para a atmosfera, e dar destino aos subprodutos agroindustriais que, normalmente, são tratados como simples rejeitos [3].
É sabido que as adições minerais têm grande influência na vida útil e na durabilidade do concreto, uma vez que promovem o preenchimento dos vazios pelo efeito fíller, na colmatação dos poros, resultando em uma estrutura mais densa e compacta.
Os benefícios das adições estão na trabalhabilidade, exsudação, densidade, permeabilidade e resistência, o que contribui de maneira direta para a durabilidade do concreto [13].
No entanto, Papadakis (2000) apud Kulakowski [7], observa que o comportamento das adições minerais em relação à durabilidade das estruturas ainda necessita de muitos estudos, colocando a importância de desenvolver pesquisas e gerar dados no sentido de elucidar e de estabelecer o melhor uso destes materiais tendo em vista a durabilidade das estruturas.

3.5.1 Modelo de previsão da vida útil

Existem diversos modelos, complexos e empíricos, de previsão da vida útil de estruturas de concreto armado e de estimativa da profundidade carbonatada concebidos por diversos autores, que segundo Possan [15], "possibilitaram

avanços consideráveis no entendimento do comportamento das estruturas de concreto expostas ao ar ao longo do tempo".
O modelo a seguir é apresentado pelos autores Cunha *et.al*,[1], os quais afirmam que "uma forma de simples de descrever a velocidade de carbonatação é assumir que essa grandeza é inversamente proporcional à espessura de concreto a ser percorrida" e que "o fenômeno de difusão pode ser definido pelas leis de Fick", conforme as equações simplificadas:

$$x = A\sqrt{t} + A_1 \quad (7)$$

ou

$$t = K.x^2 K_o \quad (8)$$

Sendo K, K_o, A, e A_1 constantes. O valor de K_o pode variar de 0 ate 10mm[9].
Os autores afirmam ainda que, "à medida que o concreto vai carbonatando, a morfologia porosa vai sendo alterada, assim como as próprias características físicas do concreto, nomeadamente a resistência à compressão".
Com base nesse comportamento, os autores utilizam uma expressão ainda mais simples para descrever o processo de carbonatação:

$$X = A.\ t^n, \text{ onde } 0 < n < 1 \quad (9)$$

Onde x representa a profundidade de carbonatação, A o coeficiente de difusão e t, o tempo (em anos). Maior parte dos estudos feitos até hoje se assumiu o valor de 0,5 para n, de forma a ser possível calcular o valor de A e estimar a velocidade de carbonatação nas diversas estruturas de concreto armado [1].

4.0 EXPERIMENTO

4.1 Materiais e métodos

O método utilizado para os procedimentos do ensaio de carbonatação, assim como, as etapas de precondicionamento foram realizados conforme preconizado pela RILEM [19]. O experimento foi organizado e direcionado para avaliar as espessuras de carbonatação em corpos de prova prismáticos (40x40x160 mm) em três traços diferentes com 0, 5 e 8% de adição mineral e cura submersa de 28 dias.
O indicador químico de ph utilizado para a determinação da profundidade foi a fenolftaleína. Foram determinadas também as resistências à compressão e flexão, assim como, a absorção de água por capilaridade em cubos com dimensões de 100x100x100mm.

4.2 Materiais utilizados

4.2.1 Água
A água utilizada para confecção das argamassas é proveniente da rede pública com abastecimento do órgão de saneamento do estado (COSANPA) cujos índices de potabilidade dentro das normas da ABNT.

4.2.2 Cimento
O cimento utilizado foi o CP II Z - 32 por ser o mais utilizado na região Norte. A tabela 1 elucida os dados referentes a este tipo de cimento conforme fabricante.

Tabela 1 – Características físicas e químicas do cimento CP II Z- 32

Cimento - CP II Z - 32	
Características Físicas	
Blaine (segundo NBR NM 76: 1998)	≥2600 (cm²/g)
Tempo de início de pega (segundo NBR NM 65: 2003)	≥ 1 (h:min)
Tempo de fim de pega (segundo NBR NM 65: 2003)	≤ 10 (h:min)
Características Mecânicas	
Resistência à compressão (segundo NBR 7215:1991)	
1 dia	
3 dias	≥10,0
7 dias	≥20
28 dias	≥32

4.2.3 Agregado miúdo

A areia utilizada na confecção das argamassas é típica da região Norte sendo caracterizada pelo seu baixo módulo de finura. A caracterização conforme NBR7217/87 é mostrada na tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização do agregado miúdo

Agregado Miúdo - Areia	
Diâmetro máximo (mm)	2,4
Módulo de finura	1,24
Massa específica(g/cm3)	2,63
Massa unitária (g/cm3)	1,55

4.2.4 Metacaulim

O Metacaulim é uma adição mineral em pó, até 30 vezes mais fina que o cimento, com coloração clara, que promove reações pozolânicas quando em contato com a pasta de cimento em função da sua alta reatividade com o hidróxido de cálcio. A adição mineral utilizada foi o *MetacaulimHP* por conta da disponibilidade em laboratório. As porcentagens de substituição foram de 0, 5 e 8% em função da quantidade de cimento dos traços. Helene & Medeiros [20] supervisionaram um estudo de avaliação da influência do *MetacaulimHp* como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland .A Tabela 3 apresenta os resultados da análise química desta adição mineral.

Tabela 3 - Resultados em % de óxidos, base calcinada, normalizados a 100%.

MetacaulimHp	
SiO2	51,57
Al2O3	40,5
Fe2O3	2,8
CaO	–
MgO	–
SO3	2,08
Na2O	3,08
K2O	0,18
Umidade	0,6
PF	2,62
Total	97,8
Equivalente alcalino	0,2
SiO2+Al2O3+Fe2O3	94,87

Como se verifica pelos resultados da Tabela 03, o *MetacaulimHP* compõe-se principalmente de sílica, alumina e outros componentes, caracterizando-se como um típico material reativo e de características pozolânicas [20].

4.3 Dosagem das argamassas

Devido o módulo de finura da areia utilizada na região de Belém ser muito baixo (na faixa de 1,24), foram feitos vários testes, haja vista que as pastas devessem ser as mesmas variando apenas as porcentagens de substituição da adição mineral, e que as misturas não ficassem muito secas a ponto de ser inexequível as moldagens e o adensamento, os traços foram fixados conforme elucida a tabela 04.

Tabela 4 – Relação dos traços utilizados

Identificação	cimento	areia	metacaulim	a/c
CP 00	1	2	0	0,45
CP 05	1	2	5	0,45
CP 08	1	2	8	0,45

4.4 Método

4.4.1 Moldagem dos corpos de prova

Terminado o processo de mistura, as argamassas foram colocadas nas formas prismáticas (40x40x160mm) e adensadas em duas camadas por uma mesa vibratória num tempo de 8s/camada. O mesmo processo foi realizado para os cubos com dimensões de 100x100x100 mm.
Finalizado o processo de adensamento as amostras foram levadas para a câmara úmida (UR≥ 81°), onde permaneceram por 24 horas até a desforma. Após serem desformadas foram colocadas e um recipiente saturado com cal para que não houvesse perda dos componentes por lixiviação, e assim permaneceram submersas pelo período de 28 dias.

4.4.2 Ensaio

Passado os 28 dias de cura submersa as amostras prismáticas foram submetidas ao processo de precondicionamento conforme preconizado pela RILEM [19]. Para a realização do ensaio de carbonatação foram utilizadas as amostras prismáticas e uma vazão de CO_2 de 5 litros/min, haja vista que a norma não estabelece valores de concentração do dióxido de carbono, a vazão foi fixada conforme o ensaio realizado por Pauletti [4].
A determinação da espessura carbonatada foi feita através de um indicador químico de ph, fenolftaleína, aspergido em fatias de +/- 20 mm sendo retirada uma fatia de cada traço, durante esse processo o ensaio era interrompido e ao término do mesmo as amostras retornavam a câmara de carbonatação sendo submetidas à concentração de Co_2 estabelecida até o momento da leitura seguinte. Foram feitas um total de quatro leituras com o auxílio de um paquímetro nos períodos de 5,10,15 e 20 dias.
A câmara de carbonatação utilizada, por não possuir um sistema de ventilação para que o gás circulasse no seu interior, não proveu uniformidade do Co_2 em todas as faces dos prismas.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Terminado os 28 dias de cura submersa as argamassas prismáticas permaneceram em laboratório e, por questão de logística, foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão e flexão aos 60 dias de idade pelo centro tecnológico de controle e qualidade L.A Falcão Bauer, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados de resistências médias à compressão e flexão.

Identificação	σc60 dias (Mpa)	σfl 60 dias (Mpa)
CP 00	60.1	8.5
CP 05	64.8	9.0
CP 08	53.2	7.8

Os resultados apresentados evidenciam a melhora das resistências à compressão e flexão até a percentagem de 5% utilizadas neste trabalho. No entanto, para a composição com 8% de metacaulim pode-se observar que a resistência à compressão foi menor quando comparada às outras misturas. Diante disso, foram moldadas novas amostras com mesmo traço de 8% de adição mineral em substituição, para efeito de ratificação dos resultados obtidos anteriormente. A Tabela 6 ilustra os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 71 dias, conforme relatório emitido pelo centro tecnológico de controle e qualidade L.A. Falcão Bauer, mesmo laboratório onde foram realizados os primeiros ensaios.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão para corpos de prova com 8% de metacaulim.

Idade	71 dias (Mpa)
Corpo de Prova n.º	Resistência R_c (Mpa)
01	50,19
02	55,17
03	54,2
04	55,30
Média	**53,80**

Conforme a elucida a Tabela 6, 53,8 MPa de média para 04 amostras de mesmo traço, não se obteve uma diferença significativa no resultado, se comparado ao anterior. Diante disso, pode-se afirmar que para misturas com 8% de metacaulim a resistência à compressão diminui.
A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos das espessuras de carbonatação nos três traços em quatro tempos distintos.

Tabela 7 – Resultados das espessuras carbonatadas.

		Espessura carbonatada (mm)				
	Identificação	Tempo (dias)	**5**	**10**	**15**	**20**
		Metacaulim				
a/c = 0,45	CP00	0%	1,5	2,1	2,3	2,4
	CP05	5%	1,3	1,8	2,1	2,2
	CP08	8%	0,4	1	1,4	1,7

A Figura 4 ilustra os resultados da evolução da frente de carbonatação nas argamassas com porcentagens distintas de metacaulim.

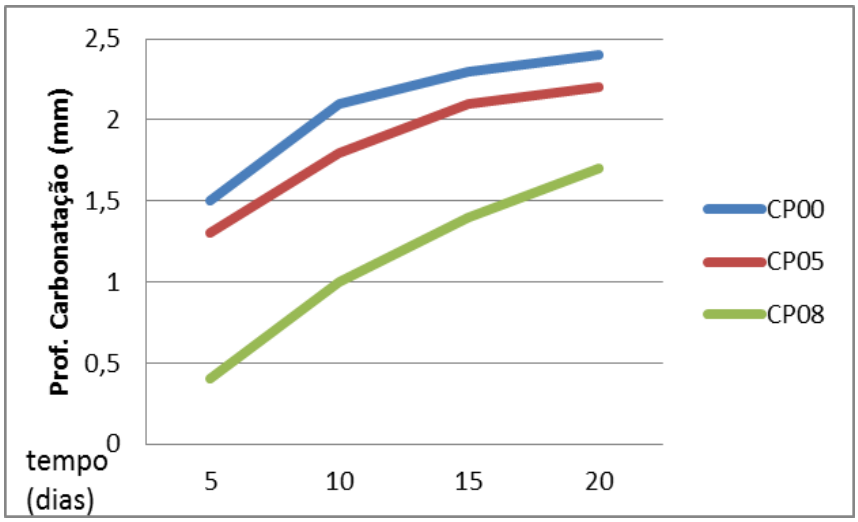

Figura 4 – Representação gráfica da relação entre a profundidade de carbonatação e o tempo (em dias) em função das adições minerais.

As Figuras 5 (a), (b), (c), e (d) elucidam as espessuras carbonatadas para os três traços em quatro períodos. Devido às espessuras apresentarem diferenças milimétricas entre si, a visualização é mais evidente através da representação gráfica da figura 5.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

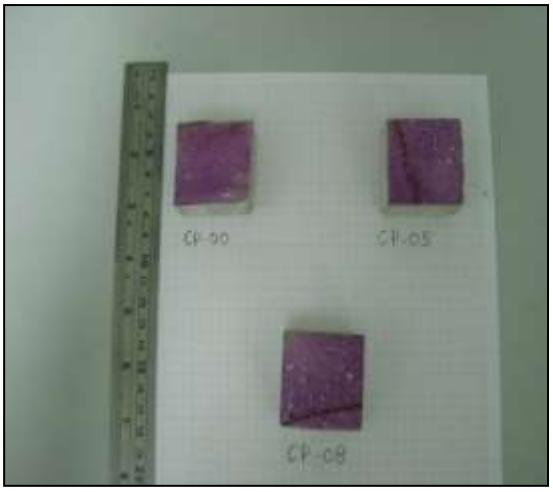

Figura 5 (a) – Corpos de prova prismáticos após 5 dias de ensaio na câmara de carbonatação com relação a/c= 0,45 e porcentagens de 0, 5 e 8% de metacaulim.

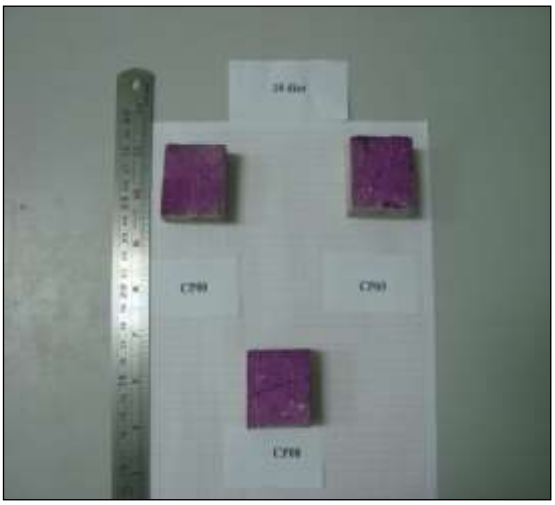

Figura 5 (b) – Corpos de prova prismáticos após 10 dias de ensaio na câmara de carbonatação com relação a/c= 0,45 e porcentagens de 0, 5 e 8% de metacaulim.

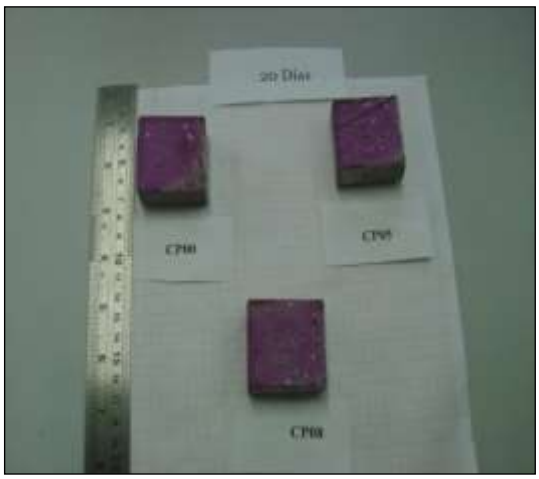

Figura 5 (c) – Corpos de prova prismáticos após 15 dias de ensaio na câmara de carbonatação com relação a/c= 0,45 e porcentagens de 0, 5 e 8% de metacaulim.



Figura 5 (d) – Corpos de prova prismáticos após 20 dias de ensaio na câmara de carbonatação com relação a/c= 0,45 e porcentagens de 0, 5 e 8%.de metacaulim.

A Figura 6 apresenta os resultados do ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade conforme NBR 9779/87.

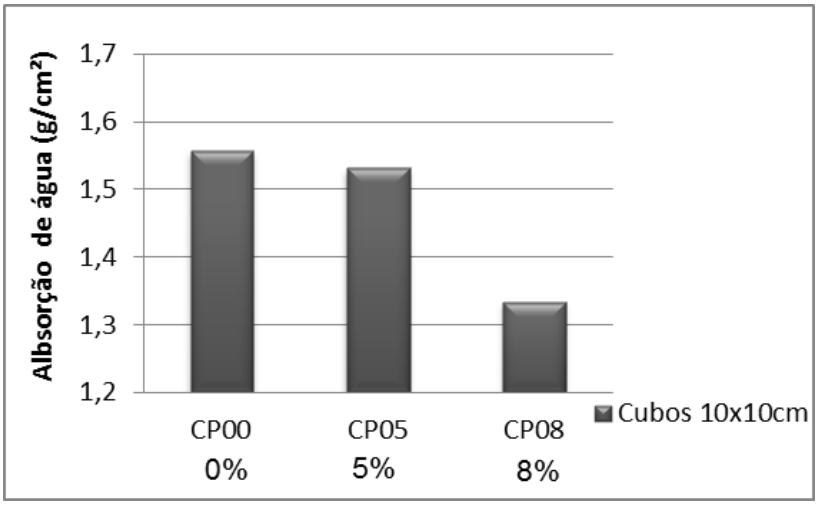

Figura 6 – Representação gráfica da absorção de água por capilaridade para os três traços utilizados.

Como esperado, houve melhora na redução da porosidade das argamassas como mostra a Figura 6.

6. CONSIDERAÇOES FINAIS

- Percebeu-se que na substituição de 8% de metacaulim não houve melhoria das propriedades mecânicas da argamassa, o mesmo não acontecendo com a carbonatação;
- Observou-se também, que a adição mineral reduz a reserva alcalina e assim aumenta a velocidade de carbonatação, no entanto a frente de carbonatação é menor devido à diminuição da porosidade, motivo pelo qual há redução na difusão do CO_2 para o interior do material;
- A adição o mineral contribuiu para a redução da porosidade da argamassa.

7. REFERÊNCIAS

[1] HELENE, P. R. L.; CALDAS DE SOUSA, C. A.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z. *Corrosão em estruturas de concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de análise.* – 1 ed. – Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2014.

[2] HELENE, P.R.L.; CUNHA, A.Q. (2001). "*Despassivação das Armaduras de Concreto por Ação da Carbonatação"* - Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

[3] HOPPE FILHO, J. *Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto***.** Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

[4] PAULETTI, C., *Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e modelos de predição*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

[5] OLLIVIER, J. P. *La carbonatation Du béton; Phénoménologie – prédction***.** INSA – Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2009.

[6] SILVA Jr, José Zacarias Rodrigues da. *Argamassas de Reparo*. 2001. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia e Construção Civil III. São Paulo, 2001.

[7] KULAKOWSKI, M. P. *Contribuição ao estudo de carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa.* 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

[8] CINCOTTO, M. A. *Fundamentos da deterioração do concreto por carbonatação e ação da água do mar; Durabilidade das estruturas de concreto armado.* Reunião Regional do IBRACON. UNAMA- Universidade da Amazônia, Belém-Pará, 1999.

[9] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais***.** São Paulo: PINI, 1994. 573p.

[10] PAULETTI, C. *Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de Carbonatação.* 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

[11] HUET, B. *Comportement à la corrosion des armatures dans un béton carbonaté. Influence de la chimie de la solution interstitielle et d'une barriére de transport.* Thése Ècole Doctorale; Ècole Doctorale Materiaux de Lyon. L'institutnational des sciences appliquées de Lyon. Thése, Ècole doctorale, 2005.

[12] CASCUDO, O. *O controle da corrosão de armaduras de concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas.* São Paulo: Pini; Goiânia, GO: Editora UFG. 1964.

[13] CADORE, W. W. *Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada.* Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008.

[14] ANDRADE, C. *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras***.** São Paulo: PINI, 1992.

[15] POSSAN, E. *Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano.* Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

[16] P. KUMAR MEHTA E PAULO J. M. MONTEIRO. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. 2 edição. 782 p. São Paulo. Editora: Nicole Pagan Hasparyk, 2014.

[17] ISO 13283. 2008. *General principles on the design of structures for durability.*

[18] TASCA, M. *Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura.* Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

[19] *Reunion internationale de laboratories d`essais et materiaus – rilem*. Measurement of hardened concrete carbonation depth. "Rilem" TC116-PCD: Permeability.

[20] HELENE, P. R. L.; MEDEIROS, M. *Estudo da influência do MetacaulimHp como adição de alta eficiência em concreto de cimento Portland.* Escola da Universidade Politécnica de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2003.

[21] HELENE, P. R. L. *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.* 1993, 231f. Tese (Livre Docência). Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

[22] N.T. American Concrete Institute. Guide to Durable Concrete: reported by ACI Committee 201.2R. In: _. *ACI Manual of Concrete Practice* . Detroit, 1991.Part 1.