

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE METACAULIM NA
ABSORÇÃO CAPILAR E PROFUNDIDADE DE
CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS**

Dardania Aparecida Evangelista Rodrigues

Belo Horizonte

2014

Dardania Aparecida Evangelista Rodrigues

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE METACAULIM NA
ABSORÇÃO CAPILAR E PROFUNDIDADE DE
CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS**

Dissertação defendida perante a banca examinadora,
como parte dos requisitos necessários à aprovação no
Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Química.

Orientadora: Vanessa de Freitas Cunha Lins

Co-orientador: Abdias Magalhães Gomes

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2014

AGRADECIMENTOS

À Deus que me colocou muitas provas para conclusão desta etapa e me mostrou ser capaz.

A minha orientadora Vanessa que sempre me apoiou e me incentivou na elaboração deste trabalho.

Aos Departamentos de Engenharia Química e Departamento de Materiais de Construção Civil que proporcionaram a realização dos ensaios. Aos técnicos de laboratório em especial ao Dedé pela colaboração e tempo disponibilizado durante a realização dos experimentos. Aos Professores Abdias e Maria Teresa responsáveis pelos laboratórios utilizados.

Ao Sergio e Matheus o meu muito obrigado pela paciência e apoio.

Aos familiares que mesmo longe são responsáveis pela minha conquista.

Ao Lucas pela força e dedicação.

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é verificar os efeitos da adição de metacaulim nas propriedades do concreto como resistência à compressão, absorção capilar e carbonatação acelerada. O metacaulim é um material fabricado através da moagem e calcinação de argilas especiais (caulim de alta pureza), em baixas temperaturas formando um material de alta atividade pozolânica (MCAR), constituído de óxido de silício e alumínio. Uma lacuna da literatura sobre a carbonatação de concreto se refere às diferenças entre o comportamento do material entre os percentuais de CO₂ mais baixos (5-10%) e mais altos (maiores que 50%). A adição de metacaulim ao concreto gerou maiores valores de absorção capilar, e a presença de dois tipos de agregados graúdos (brita) no concreto não afetou a absorção capilar. Foi observado que a profundidade de carbonatação foi maior quando da adição de metacaulim em substituição à parte da massa de cimento. A combinação de dois tipos de agregados e a presença de adição de metacaulim no concreto proporcionou menor profundidade de carbonatação, mesmo para uma resistência à compressão esperada elevada de 40MPa. A maior profundidade de carbonatação encontrada foi a da amostra que continha o cimento CPIII, que possui menor resistência inicial em relação ao outro cimento utilizado, o CPV, de alta resistência inicial. A adição de metacaulim proporciona um aumento no coeficiente de carbonatação.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS.....	V
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	VI
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO.....	4
2.1 OBJETIVO GERAL	4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 CONCRETO	5
3.1.1 <i>Cimento Portland</i>	6
3.1.2 <i>Aditivos</i>	9
3.1.3 <i>Agregados</i>	10
3.1.4 <i>Água</i>	10
3.1.5 <i>Adições Minerais</i>	11
3.1.6 <i>Durabilidade dos concretos com adições minerais</i>	13
3.2 ABSORÇÃO CAPILAR	14
3.3 CARBONATAÇÃO DO CONCRETO	15
3.3.1 <i>Mecanismo de Carbonatação</i>	18
4 METODOLOGIA	25
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	25
4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	26
4.3 ENSAIO DE ABSORÇÃO CAPILAR	26
4.4 ENSAIO DE CARBONATAÇÃO DO CONCRETO	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1 COMPRESSÃO DO CONCRETO.....	28
5.2 ABSORÇÃO CAPILAR	30
5.3 CARBONATAÇÃO.....	36
6 CONCLUSÕES.....	39
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	41
8 REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	42
9 APENDICE.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Influência do teor de CO ₂ no coeficiente de carbonatação.....	18
Figura 3-2: Medida de profundidade de carbonatação	21
Figura 3-3: Imagens de a) a e) retratam o método de análise adotado por Pauleti (2004).	23
Figura 3-4: Medida de profundidade de carbonatação	28
Figura 5-1: Absorção capilar do traço 1, relação a/agl = 0,5 X traço 2 relação a/agl = 0,48 ...	31
Figura 5-2: Absorção capilar do traço 4, relação a/agl = 0,40 X traço 5 relação a/agl = 0,4731	
Figura 5-3: Absorção capilar do traço 4, composto por cimento, areia, brita 1 e relação a/c =0,4.....	32
Figura 5-4: Absorção capilar traço 10 relação a/agl 0,48 X traço 11 relação a/agl 0,40.....	32
Figura 5-5: Absorção capilar traço A relação a/agl 0,50 X traço B relação a/agl 0,48	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Principais compostos do Cimento Portland (Beltrão <i>et al.</i> 2010).....	7
Tabela 3-2: Limites de teores de compostos para cimentos de ASTM C150 (BELTRÃO, 2010).....	7
Tabela 3-3: Classificação dos Aditivos.	9
Tabela 3-4: Abertura das peneiras para os agregados.	10
Tabela 3-5: Teor máximo de cloreto em água de amassamento.....	11
Tabela 4-1: Composição dos concretos estudados	25
Tabela 4-2: Traços dos concretos estudados	26
Tabela 5-1: Valores aproximados de resistência à compressão	28
Tabela 5-2: Valores de resistência à compressão aos 28 dias	29
Tabela 5-3: Absorção capilar dos concretos (g/m ²) – Massa de Água Absorvida	30
Tabela 5-4: Coeficiente da Curva de Abrans para Absorção Capilar dos traços pesquisados .	34
Tabela 5-5: Valores de absorção capilar para os traços estudados pela Equação de Abrans e medidos e suas respectivas relações a/agl.	34
Tabela 5-6: Profundidade de carbonatação do concreto.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

MK – Metacaulim

CAA – Concreto autoadensável

SCC – Concreto autoadensável altamente durável

CaO - Óxido de cálcio

a/agl – Relação água aglomerante

$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - Silicato tricálcico

$4\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - Silicato tetracálcico

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ - Aluminato Tricálcico

$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ - Ferroaluminato tetracálcico

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CP I - Cimento Portland

CP I-S - Cimento Portland com Adição

CP II-E - Cimento Portland Composto com Escória

CP II-Z - Cimento Portland Composto com Pozolana

CP II-F - Cimento Portland Composto com Filler

CP III - Cimento Portland de Alto-Forno

CP IV - Cimento Portland Pozolânico

CP V ARI - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

NBR - Norma Brasileira

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnica

NM - Norma Mercosul

ISO - *International Organization for Standardization* (Organização Internacional para Padronização)

CH - Hidróxido de cálcio

MCAR - Material de alta atividade pozolânica

$\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH}_4)$ - Caulinita

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Hidróxido de cálcio

$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ - Gelemita

C-S-H - Silicatos de cálcio hidratado

T - Temperatura

UR - Umidade relativa

OH - Hidróxido

Ref - Amostra de referência

Met - Amostras que contém adição de metacaulim

A e B - Constantes da equação de Abrans

R² - Coeficiente de determinação da Equação de Abrans

ABS - Absorção Capilar

1 INTRODUÇÃO

Desde o surgimento da patente do cimento Portland, obtida por Joseph Aspdin em 1824, a humanidade vem construindo suas edificações com designs cada vez mais arrojados, técnicas construtivas mais eficientes e materiais mais avançados. Entretanto, o concreto continua sendo cada vez mais utilizado, composto por uma mistura de cimento, adições, agregados e água, podendo ser reforçado por armaduras formando o concreto armado ou protendido. A grande utilização do concreto se deve ao fato da facilidade de moldagem e de poder ser confeccionado no local. O concreto tem como componente mais importante o cimento, que determina a união dos agregados, fator importante na resistência mecânica do concreto. Devido à escassez de matéria prima para fabricação de cimento e à grande preocupação com o meio ambiente, vários estudos estão sendo feitos para substituição de parte da massa de cimento por outros componentes que proporcionem as mesmas características técnicas, econômicas e ambientais do concreto, ou que confirmem propriedades superiores. Dentre estas adições, pode-se destacar como as mais utilizadas o metacaulim, a escória de alto forno e a sílica ativa (SORIANO *et al.*, 2013; FRÍAS *et al.*, 2000; HOU *et al.*, 2004; KORPA *et al.*, 2008; PU, 1999; MADANI *et al.*, 2012; SHAYAN e XU, 2006; HOSSAIN, 2005).

A utilização de argila calcinada, sob a forma de metacaulim (MK), como um material pozolânico para argamassas e concreto tem recebido uma atenção considerável nos últimos anos. Este interesse é parte da atenção dirigida para a utilização de resíduos e subprodutos industriais, a fim de minimizar o consumo de cimento Portland já que sua fabricação traz prejuízos para o ambiente. Outra razão é que argamassa e concreto que contêm materiais pozolânicos exibem um aumento considerável na resistência e durabilidade (PERLOT *et al.*, 2013; HASSAN *et al.*, 2012; WILD *et al.*, 1996; SHA e PEREIRA, 2001; BADOGIANNIS e TSIVILIS, 2009; BADOGIANNIS *et al.*, 2005; MOULIN *et al.*, 2001; BATIS *et al.*, 2005; VANCE *et al.*, 2013; SABIR e BAI, 2001; BROOKS e Johari, 2001; Poon *et al.*, 2003; GAMEIRO *et al.*, 2014; CASSAGNABÈRE *et al.*, 2013; BAI e Wild, 2002; AQUINO *et al.*, 2001; FORTES - REVILLA *et al.*, 2006; KU *et al.*, 2011). A literatura demonstra que o metacaulim é uma pozolana eficaz que atua na estrutura de poros e aumenta a resistência do

concreto à entrada de agentes agressivos (SABIR e BAI, 2001) e a resistência à compressão (BELTRÃO *et al.*, 2010).

O metacaulim pode reduzir o impacto ambiental de concretos devido à sua menor emissão de dióxido de carbono do que o clínquer. O desenvolvimento de uma forma de pasta de metacaulim abre novos campos de investigação, tais como a sua incorporação em concreto auto-adensável (CAA) (PERLOT *et al.*, 2013).

Kou *et al.* (2011) relataram que o metacaulim contribuiu para ambas as propriedades de curto e longo prazo do concreto. A substituição de cimento por 15% de MK melhorou tanto as propriedades mecânicas quanto a durabilidade do concreto. Além disso, os resultados mostram que as contribuições das misturas minerais para a melhoria do concreto reciclado são mais significativas do que para o concreto natural. Batis *et al.* (2005) concluíram que a adição de 10% em massa de metacaulim aumentou a resistência mecânica e à corrosão das amostras de argamassa.

Metacaulim possui um efeito no concreto muito parecido com a sílica ativa (SF). Enquanto o concreto com sílica ativa é caracterizado por desempenho mecânico e durabilidade superior, o concreto contendo MK atinge propriedades comparáveis a um preço menor e com melhor trabalhabilidade. Concretos autoadensáveis altamente duráveis (SCC) podem ser produzidos usando um conteúdo de metacaulim de cerca de 20%. Os resultados também mostram que a durabilidade de SCC, especialmente com elevado teor de MK, é maior do que a de SCC contendo SF (HASSAN, 2012).

Badogrannis e Tsivilis (2009) relataram que um concreto com adição de metacaulim exibe menor permeabilidade a cloretos e a gases. A adição de metacaulim reduz o tamanho de poro médio do concreto e melhora a uniformidade da distribuição de tamanho de poros

Badogiannis (2005) concluiu que o metacaulim tem um efeito muito positivo na resistência do concreto após 2 dias e, especificamente, aos 28 e 180 dias. Os cimentos com adição têm maior demanda de água e o consumo de água é maior quanto maior for o teor de metacaulim. A reação pozolânica é acelerada entre 7 e 28 dias, acompanhada por uma diminuição acentuada do teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Finalmente, os autores concluem que um teor de metacaulim de 10% parece ser mais favorável do que 20% (BADOGIANNIS, 2005).

O metacaulim é um material produzido pela calcinação de argilas caulínicas ou argilas especiais (caulim de alta pureza) e induz reações pozolânicas no concreto. Estas reações reduzem o teor de hidróxido de cálcio na solução dos poros do concreto, fazendo com que ele precise de uma quantidade menor de CO_2 para reagir com hidróxido de cálcio formando carbonatos. Assim, a taxa de carbonatação aumenta, devido à menor quantidade de hidróxido de cálcio para reagir com o CO_2 que difunde nos poros do concreto. Assim, o concreto com adições minerais são mais suscetíveis aos efeitos da corrosão das armaduras (BARIM, 2008).

Devido ao aumento da geração de CO_2 no ambiente proporcionado pelo aumento da produção industrial, da população mundial e com o conseqüente aumento no número de veículos automotivos nas cidades, houve uma necessidade de se determinar parâmetros de durabilidade do concreto.

A deterioração das armaduras pode se dar devido a efeitos da carbonatação do concreto, do ataque de íons cloretos, do ataque químico por várias substâncias como os ácidos, dentre outras causas. Além do prejuízo financeiro, a recuperação da vida útil das estruturas torna-se difícil ou mesmo inviável. A carbonatação por si só não é prejudicial ao cimento, mas a acidez gerada provoca o início do processo de corrosão das armaduras no concreto armado ou protendido. Isso se deve devido à redução do pH do concreto levar à perda da proteção química permitindo a penetração de água e/ou gases que proporcionam a corrosão da armadura.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o tamanho e a continuidade dos poros, durante o processo de hidratação, irão controlar o coeficiente de permeabilidade de diferentes espécies no concreto. A estrutura interna da pasta hidratada será fundamental para se obter uma maior ou menor resistência à penetração de agentes agressivos para o interior do concreto, que provocam o início de processos de degradação nas estruturas de concreto armado.

Neste trabalho, foi avaliada a carbonatação, a absorção capilar, e a resistência à compressão de concretos utilizando-se dois tipos de cimento, o CPIII e o CPV, bem como a substituição de parte do cimento por uma adição de metacaulim.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

- Verificar os efeitos da adição de metacaulim nas propriedades do concreto como resistência à compressão, absorção capilar, e carbonatação acelerada.

2.2 Objetivos Específicos

- Moldagem de concretos com o objetivo de obter resistência à compressão de 30MPa e 40MPa, contendo somente cimento como aglomerante e substituindo parte do cimento por metacaulim.

-Utilização de dois tipos de cimento CPIII e CPV, o mesmo ativador químico e dois tipos de brita para assemelhar ao máximo a situação utilizada na prática.

- Avaliação da resistência à compressão dos traços utilizados

- Determinação da absorção capilar para todos os corpos de prova

- Determinação da profundidade de carbonatação acelerada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Concreto

O concreto é um material constituído por mistura pré-fixada de aglomerante com água e com agregados graúdos e miúdos. O conjunto cimento mais água é denominado de pasta; adicionando-se o agregado miúdo à pasta, obtém-se a argamassa. Adicionando-se a esta o agregado graúdo, tem-se o concreto (SILVA *et al.*, 2007).

A função da pasta do concreto é envolver os agregados, preencher os vazios além de proporcionar a trabalhabilidade do concreto em estado fresco. Já o agregado tem a função de resistir aos esforços solicitantes. É na pasta onde formam os poros e os caminhos para a entrada de agentes agressivos no concreto dentre eles o gás carbônico.

O concreto tem um excelente potencial de resistir à compressão enquanto que sua resistência à tração corresponde a cerca de 10% da resistência à compressão. Assim, é comum a utilização de concreto armado pela introdução de barras de aço ao concreto.

A principal característica do concreto é a resistência à compressão, que é bastante variável mesmo com a mesma dosagem e qualidade dos materiais empregados. A resistência à compressão depende da relação água/aglomerante (a/agl) e do adensamento do concreto. A trabalhabilidade do concreto é inversamente proporcional à resistência à compressão e diretamente proporcional à relação água/aglomerante.

Após a mistura do aglomerante e dos agregados e destes entrarem em contato com a água o lançamento do concreto deve ser o mais rápido possível visto que as reações químicas do cimento demoram aproximadamente duas horas e trinta minutos para iniciar o processo de início de pega, iniciando assim o endurecimento do concreto. Após o lançamento, é necessário o adensamento que tem como objetivo expulsar as bolhas de ar retidas no interior do concreto fresco.

Um concreto com características de durabilidade deve apresentar uma estrutura bastante compacta com o menor número de vazios e interconexões entre seus poros, pois em geral,

quanto maior a compacidade menos permeável será o concreto. O grau de hidratação do cimento, o início da hidratação e a quantidade de água misturada ao cimento são fatores que interferem no volume de vazios capilares da pasta de concreto. O tamanho dos poros do concreto não depende somente da composição, e sim das condições de cura do mesmo.

Segundo Barin (2008) a permeabilidade, apesar de ser propriedade de difícil mensuração, uma vez que varia com o tempo devido à lixiviação causada pela própria água pura, é uma característica fundamental para a durabilidade dos concretos. Patologias são causadas no concreto devido à mecanismos de transporte de água, dióxido de carbono e oxigênio do meio externo para o meio interno. A permeabilidade de uma pasta completamente hidratada pode ser da ordem de 10^6 vezes menor que a de uma pasta com baixa idade (Mehta e Monteiro,1994).

Dentre os fatores que determinam a intensidade da permeabilidade tem-se a relação a/a_g ; o grau de hidratação, o tipo de cimento, a adição mineral, procedimentos de cura, e os tipos de agregados.

A qualidade do concreto é inversamente proporcional aos índices de permeabilidade e absorção. Além da permeabilidade, tem-se a difusão como mecanismo de transporte no interior do concreto.

A difusividade iônica acontece devido a diferenças nos gradientes de concentração iônica, seja entre o meio externo e o interior do concreto, seja dentro do próprio concreto. O dióxido de carbono, íons cloretos e oxigênio penetram no concreto, através do fenômeno de difusão o que torna este tipo de mecanismo muito importante no estudo das patologias das estruturas de concreto armado, uma vez que a soma da ação destes agentes provoca a corrosão das armaduras precedida pela carbonatação. A difusão ocorre somente quando os poros estão totalmente saturados.

3.1.1 Cimento Portland

O cimento, principal componente do concreto, é o material que ocupa o segundo lugar em relação ao uso pela humanidade, perdendo apenas para a água. É um material que permite aos engenheiros e arquitetos serem ousados em seus projetos.

Segundo Beltrão *et al.* (2010), a fabricação do cimento é uma das maiores fontes de gases poluentes que contribuem para o efeito estufa, atrás apenas da queima de combustíveis fósseis.

O Cimento Portland pode ser definido como aglomerante hidráulico de material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos. Estes compostos complexos ao serem misturados com água hidratam-se e produzem o endurecimento da massa proporcionando resistência ao material. A denominação de aglomerante hidráulico ao cimento se deve ao fato do mesmo só reagir após o contato com a água.

Dentre as várias matérias primas do cimento, pode-se destacar como principais o óxido de cálcio CaO, a sílica SiO₂, a alumina Al₂O₃ e o óxido de ferro Fe₂O₃ conforme representados na Tabela 3-1.

Tabela 3-1: Principais compostos do Cimento Portland (BELTRÃO *et al.* 2010).

Nome do composto	Óxido	Abreviação	Composição em Óxidos	Abreviação
Silicato tricálcico	CaO	C	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcico	SiO ₂	S	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato Tricálcico	Al ₂ O ₃	A	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminato tetracálcico	Fe ₃ O ₃	F	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Os três primeiros compostos da Tabela 3-1 tem influência direta na resistência do concreto nas primeiras idades enquanto que o C₄AF é responsável somente pela parte comercial, ou seja, é um coposto que facilita a produção comercial do cimento.

A classificação do cimento se deve à proporção de cada composto C₃S, C₂S, C₃A e C₄AF, ou seja, as características desejadas para o cimento. A ASTM C50 determina ao teor de cada composto para cada tipo de cimento conforme Tabela 3-2.

Tabela 3-2: Limites de teores de compostos para cimentos de ASTM C150 (Beltrão, 2010).

Composto (%)	Tipo				
	I	II	III	IV	V
C ₃ S Max	-	-	-	35	-
C ₂ S Max	-	-	-	40	-
C ₃ A Max	-	8	15	7	5

(C ₄ AF +2C ₃ A) Max	-	-	-	-	25
--	---	---	---	---	----

Devido à diversidade de tipos de cimento e da necessidade de criação de novos tipos de cimentos compostos para atender características físicas, químicas ou mecânicas existem normas brasileiras que especificam as características mínimas de cada tipo conforme designações:

- Cimento Portland (NBR 5732/91)
 - CP I: Cimento Portland
 - CP I-S: Cimento Portland com Adição
- Cimento Portland Composto (NBR 11578/91)
 - CP II-E: Cimento Portland Composto com Escória
 - CP II-Z: Cimento Portland Composto com Pozolana
 - CP II-F: Cimento Portland Composto com Filler
- Cimento Portland de Alto-Forno (NBR 5735/91)
 - CP III
- Cimento Portland Pozolânico (NBR 5736/91)
 - CP IV
- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (NBR 5733/91)
 - CP V – ARI
- Cimento Portland Branco (NBR 12989/93)
 - CPB
- Cimento Portland para poços petrolíferos (NBR 9831/06)
 - CPP
- Cimento Portland de baixo calor de hidratação (NBR13116/94)

Os cimentos CP V- ARI possuem a característica de uma alta resistência à compressão nas primeiras idades, sendo mais utilizados em situações onde a necessidade de desforma e utilização das estruturas seja mais urgente. Já os outros tipos de cimento tendem a obter sua resistência após os 28 dias de moldagem, bem como possuem um limite superior de resistência á compressão próximo de 50MPa, enquanto que para o cimento ARI este limite é indeterminado.

3.1.2 Aditivos

Os aditivos são produtos que adicionados em pequenas quantidades ao concreto de cimento Portland, modificam algumas de suas propriedades no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições (NBR 11768/92). A Tabela 3-3 abaixo retrata a classificação dos aditivos segundo a norma.

Tabela 3-3: Classificação dos Aditivos.

Aditivo	Característica
Aditivo tipo P – aditivo plastificante	Reduzem o teor de água adicionado de 5% a 10%, (NEVILLE, 1997), torna o concreto mais fluido. Utilizado em estruturas de armadura intensa. Aumenta a resistência do concreto.
Tipo R- Aditivo retardador	Proporciona um lento endurecimento, aumenta o tempo de início e fim de pega, proporciona concretagens em altas temperaturas e de locais que necessitam de acabamento.
Tipo A _aditivo acelerador	Proporcionam uma rápida resistência inicial, desforma rápida e concretagens a baixas temperaturas. Acelera o início e fim de pega do cimento
Tipo PR – Aditivo plastificante retardador	Combina os efeitos do aditivo plastificante e retardador
Tipo PA – Aditivo plastificante acelerador	Combina os efeitos do aditivo plastificante e acelerador
Tipo IAR – Aditivo incorporador de ar	Torna o concreto mais resistente a ciclos de congelamento e descongelamento. É indicado para concretos leves, mas se usado em grandes quantidades reduz a resistência do concreto.
Aditivo SP – Aditivo superplastificante	Reduz o teor de água adicionado de 25% a 32%, (NEVILLE, 1997), atua de forma mais intensa que os plastificantes comuns.
Aditivo SPR – Aditivo superplastificante retardador	Combina os efeitos dos aditivos superplastificante e retardador
Aditivo SPA – Aditivo superplastificante acelerador	Combina os efeitos dos aditivos superplastificante e acelerador
Aditivo Impermeabilizante (hidrofugante)	Atua de modo a tornar o concreto hidrófobo, fechando os poros capilares.
Aditivos Bactericidas e similares	Incorporam substâncias tóxicas ao concreto com objetivo de evitar a proliferação de bactérias que podem provocar a corrosão das armaduras.
Aditivos expansores	Produzem a expansão do concreto durante o período de hidratação, gerando gás e aumentando o volume.

Aditivos estabilizadores ou inibidores de hidratação	Reduzem ou retardam a hidratação do cimento por um determinado período
--	--

3.1.3 Agregados

Os agregados podem ser oriundos da natureza ou artificiais, são obtidos através do processo de britagem ou moagem, ou de uma diversidade de processos industriais a partir de uma rocha mãe. Dentre os diversos tipos, os mais comuns são os seixos, as britas e as areias.

As propriedades dos agregados influenciam na qualidade final do concreto, devendo as jazidas ser levadas em consideração na elaboração do traço do concreto.

Na obtenção de concretos com especificações de qualidade mais rigorosas, são utilizados agregados de pelo menos dois tamanhos, os quais podem ser denominados agregados graúdos, designados na maioria por seixo ou brita, e agregados miúdos, designados por areias (BELTRÃO *et al.*, 2010).

Para os agregados naturais, a ABNT possui a norma NBR 7211/05 onde os agregados são classificados em graúdos e miúdos através do peneiramento do material. As peneiras são definidas na ABNT NBR NM ISO 03310-1 e o ensaio de peneiramento é definido pela norma ABNT NBR NM 248. A abertura da malha para cada agregado é definida na Tabela 3-4.

Tabela 3-4: Abertura das peneiras para os agregados.

Agregado	Abertura da malha
Miúdo	Passantes na 4,75mm e retidos na 150 μ m
Graúdo	Passantes na 75mm e retidos na 4,75mm

3.1.4 Água

Para que as reações do cimento se iniciem é necessário que o mesmo entre em contato com a água. A água proporciona maior trabalhabilidade ao concreto. A relação água/aglomerante deve ser levada em consideração, pois ela é um dos fatores determinantes da resistência do concreto. Um dos materiais conhecidos feitos a base de cimento com maior resistência apresentava uma relação de água/cimento de 0,08 e que depois de adensado apresentou resistência de 345MPa (NEVILLE, 1997 *apud* BELTRÃO *et al.*, 2010).

Ao se reduzir a relação água/aglomerante tem-se uma redução da porosidade do concreto, mas o mesmo sofre alterações na trabalhabilidade e endurecimento. Para reduzir este efeito, utilizam-se aditivos plastificantes.

A água também tem um papel importante na cura do concreto pois a mesma evita que haja um aquecimento do concreto bem como uma perda acelerada da água de amassamento.

A qualidade da água é de fundamental importância para a produção de um concreto de qualidade, pois as impurezas podem reagir com o concreto e proporcionar a corrosão das armaduras, com isto a água utilizada em todas as fases da produção do concreto deve seguir as especificações de potabilidade vigentes, conforme Tabela 3-5.

Tabela 3-5: Teor máximo de cloreto em água de amassamento.

Uso Final	Teor máximo de Cloreto mg/L	Procedimento de ensaio
Concreto Protendido ou graute	500	ABNT NBR 15900-6
Concreto Armado	1.000	
Concreto Simples (sem armadura)	4.500	

Fonte: ABNT NBR 15900-1: 2009.

3.1.5 Adições Minerais

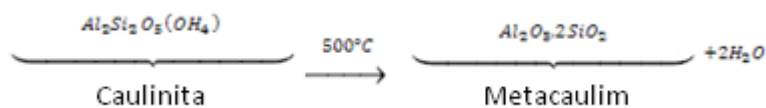
Com o aumento da necessidade de aproveitamento de resíduos industriais e de reduzir o impacto ambiental causado na extração de materiais para a confecção do concreto é crescente o uso de adições minerais pozolânicas ou cimentícias no concreto, na maioria das vezes melhorando características de desempenho e durabilidade.

As reações pozolânicas induzem a uma redução no teor de CH, na solução dos poros do concreto, fazendo com que se necessite de uma quantidade menor de CO₂ para reagir com o CH e formar os carbonatos. Com isto, a velocidade de carbonatação aumenta, já que, devido à menor quantidade de CH para reagir, a difusão do CO₂ nos poros é mais rápida. Logo, os concretos com adições minerais estão mais suscetíveis aos efeitos da corrosão de armaduras e em um espaço de tempo inferior aos concretos produzidos com cimento sem adição (BARIN, 2008).

3.1.5.1 Metacaulim

O metacaulim é um material fabricado a partir da calcinação de argilas caulínicas. Recentemente, é obtido através da moagem e calcinação de argilas especiais (caulim de alta pureza) em baixas temperaturas formando um material de alta atividade pozolânica (MCAR).

Tanto o metacaulim quanto o MCAR possuem composições químicas e proporções semelhantes de SiO_2 e Al_2O_3 em massa. A caulinita, mineral que dá nome ao grupo das argilas caulínicas, apresenta uma composição química teórica de, aproximadamente, 39,8% Al_2O_3 , 46,3% SiO_2 e 13,9% H_2O (CARMO, 2008). Para o desenvolvimento das propriedades pozolânicas das argilas é necessário que elas sofram um tratamento térmico entre 400°C e 550°C pois sua composição química não é parâmetro para sua avaliação de pozolanidade, somente para determinar se é cristalina ou não cristalina e procedência. O processo químico da onde a caulinita é transformada em metacaulim é descrito pela equação:



Equação 1

Devido à elevada finura do metacaulim sintetizado, o mesmo tem função de microfiller de nucleação e de densificação da zona de transição nos concretos.

Como o metacaulim é uma adição de características pozolânicas ele possui os seguintes benefícios ao concreto segundo Carmo *et al.* (2008):

I) Estado fresco:

a) aumento do consumo de água;

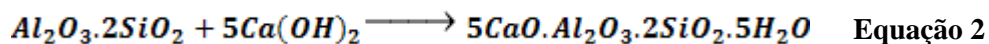
b) aumento da trabalhabilidade;

c) melhoria no aspecto reológico do concreto devido ao aumento da quantidade de pasta, devido ao menor diâmetro das partículas de pozolanas, o que reduz o tamanho e o volume de vazios.

II) Estado endurecido:

- a) aumento da resistência à compressão e da durabilidade devido ao refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta hidratada;
- b) aumento da resistência à tração;

O hidróxido de cálcio do cimento reage com a sílica do metacaulim formando um composto mais resistente. Esta reação é conhecida esquematicamente como “C-A-S-H” ou “Gelenita” e descrita quimicamente como



Em seus ensaios Carmo *et al.* (2008) concluíram que a adição de 8% de sílica ativa, ou de MCAR, proporciona melhoria na resistência à compressão, melhoria na trabalhabilidade, propriedades mecânicas e boa relação custo benefício, sendo a redução de custo do concreto com adição de aproximadamente 17% em relação ao concreto de referência.

3.1.6 Durabilidade dos concretos com adições minerais

Ao se projetar uma estrutura de concreto, leva-se em conta a resistência à compressão, característica mecânica, que, quando alta, torna o concreto menos permeável, e conseqüentemente mais durável. Porém, deve-se levar em conta também as condições climáticas à qual a estrutura ficará exposta visto que a mesma deve manter todas as suas características por toda a sua vida útil, e os agregados disponíveis na região.

As características físicas e químicas dos componentes do concreto são fundamentais para a durabilidade das estruturas, para isto o concreto tem que cumprir sua função de proteger as armaduras de agentes agressivos do meio externo.

O revestimento do concreto às armaduras tem a função de formar uma barreira física impedindo o ingresso de agentes externos protegendo quimicamente a alcalinidade da solução aquosa presente nos poros do concreto e garantindo a integridade da camada passivadora das armaduras.

A durabilidade do concreto está intimamente ligada à porosidade e à permeabilidade do mesmo, pois é através destas que os agentes agressivos penetram na estrutura proporcionando

a queda da qualidade do concreto. A porosidade exerce maior influência que a permeabilidade pois está ligada ao transporte de agentes agressivos para o concreto.

Existe atualmente a necessidade de investir em novos materiais e tecnologias com o objetivo de aumentar a durabilidade das estruturas de concreto, desde que seja respeitada a fase de projeto, pois esta sendo bem feita reduz o custo em manutenção e aumenta a vida útil da estrutura. Devido a esta necessidade é comum o uso de adições nos concretos.

As adições minerais provocam o refinamento dos poros e, conseqüentemente, atuam na porosidade da pasta, tornando o concreto menos suscetível à penetração de agentes agressivos (BARIN, 2008). Mas, as adições minerais atuam como reagentes das reações pozolânicas, consumindo hidróxido de cálcio, elemento responsável pelo elevado pH do concreto, iniciando o processo de carbonatação. Através do fenômeno de carbonatação, a camada passivadora do aço é dissolvida tornando a armadura suscetível à corrosão.

As adições minerais podem trazer tanto benefícios quanto prejuízos às estruturas de concreto armado, devido a este fato antes de utilizar adições deve-se fazer um estudo das características mecânicas e de durabilidade através de parâmetros como: resistividade elétrica, penetração de cloretos e resistência à carbonatação.

3.2 Absorção Capilar

Segundo Barin (2008), a absorção capilar é um fenômeno que ocorre em estruturas porosas e consiste na ação de forças de atração dos poros da estrutura sobre os líquidos, que estão em contato com sua superfície. Mede-se pela absorção o volume dos poros, que nada tem a ver com a facilidade com a qual um fluido pode penetrar no concreto, já que não existe uma relação necessária entre as duas quantidades (NEVILLE, 1997). Quando algum líquido é absorvido através deste fenômeno, pode levar consigo sais ou elementos prejudiciais ao sistema concreto-aço, pois se sabe que uma das maiores causas de patologias de estruturas de concreto é a corrosão da armadura.

O fenômeno de absorção capilar tende a ocorrer de maneira mais intensa quando a relação água/aglomerante, é pequena e quando há utilização de adições minerais no concreto. Isto ocorre pois quanto menor o diâmetro dos poros capilares, maior a pressão hidrostática na estrutura. A água em pequenos capilares, de diâmetro entre 5 e 50 μ m, exerce pressão

hidrostática e sua remoção tende a induzir uma tensão de compressão sobre as paredes sólidas do poro capilar, causando também a contração do sistema (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Alem do diâmetro dos poros, tem-se a intercomunicação entre os capilares internos do concreto como fatores que dificultam o controle da absorção capilar no concreto. E, dependendo da intensidade e do tamanho da rede de poros, o processo de deterioração da armadura no concreto armado ocorre de maneira muito rápida e intensa. Segundo Barim (2008), para minimizar o efeito da absorção, pode-se procurar interromper a continuidade dos poros, de maneira a impedir a passagem de líquido entre eles, através do uso de aditivos incorporadores de ar.

Segundo Helene (1993), a absorção é uma das propriedades que regem o transporte de íons no interior do concreto. A absorção capilar é mais importante para a durabilidade que a permeabilidade, na avaliação da penetração dos fluidos no concreto (CAMARINI, 1999). Como as estruturas de concreto em geral estão na parte externa das construções, ambas estão constantemente sujeitas ao processo de molhagem e secagem, ou seja, ao constante processo de absorção capilar, com isso sofrem grande influência do transporte de água e agentes agressivos para o interior do concreto que causam a deterioração da armadura.

A absorção capilar é influenciada após a adição de metacaulim. Em seus resultados Beltrão (2010) verificou uma redução de 29% na absorção capilar do concreto de referência para o concreto contendo 14% de adição de metacaulim, ou seja, o aumento do teor de adição de metacaulim contribui para a redução da porosidade do concreto, exercendo influencia direta sobre a capacidade de absorção de água.

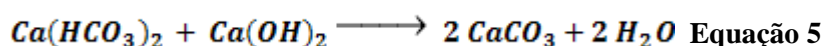
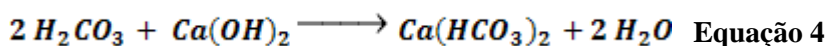
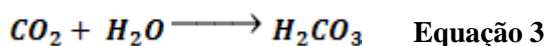
3.3 Carbonatação do Concreto

A hidratação do cimento gera, genericamente, silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), que conferem resistência ao concreto, e hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , principal responsável pela geração de um ambiente alcalino (pH próximo de 13). No concreto armado, a elevada alcalinidade gera uma camada passivante ao longo das barras de aço, que as protegem do fenômeno de corrosão.

O gás carbônico gasoso, CO_2 , não é prejudicial ao concreto, mas o mesmo em contato com a umidade forma o ácido carbônico (H_2CO_3) que é o responsável pelo fenômeno da

carbonatação. O maior índice de carbonatação do concreto, geralmente, ocorre nos grandes centros urbanos devido a grande concentração de agentes produtores de CO₂ como veículos automotivos e indústrias. Nos grandes centros urbanos, a concentração de CO₂ pode variar de 0,03% a, excepcionalmente, 1%. Com a presença do gás carbônico, o pH do concreto diminui, permitindo a despasseivação da armadura e, conseqüentemente, o início da corrosão.

O fenômeno da carbonatação pode ser ocasionado pelas reações químicas provenientes da interação entre os principais constituintes provenientes na atmosfera, como o CO₂ com os produtos da hidratação do cimento, que se encontram no líquido intersticial dos poros (CUNHA, 2001; HELENE, 2001). Segundo Bary e Sellier (2004), esta reação ocorre entre os íons cálcio contidos na solução aquosa dos poros em equilíbrio e os produtos de hidratação do cimento, conforme equações:



Liang, citado por Salmão *et al.*(2008), afirma que a carbonatação possui os estágios de iniciação e propagação. O período de iniciação é definido como o tempo de exposição até que o gás carbônico penetre na cobertura de concreto e despasse as barras de aço iniciando a corrosão. A degradação começa e se estende até o limite de deterioração das propriedades físicas do material ser alcançado. Este intervalo é a etapa de propagação. De acordo com Barin (2008), a carbonatação pode ser dividida em três áreas: não carbonatada (pH>12), em processo de carbonatação (pH entre 9 e 12), e carbonatada (pH<9).

A fenolftaleína é uma das substâncias que pode ser utilizada para medir a profundidade de carbonatação pois a mesma ao entrar em contato com o concreto identifica a zona não carbonatada em vermelho e a zona carbonatada permanece incolor (BELTRÃO *et al.*, 2010).

A carbonatação não é observada externamente à estrutura até que a frente de carbonatação atinja a armadura provocando manchas, fissuras, deslocamentos, perda de seção e aderência, comprometendo a durabilidade.

O resultado da carbonatação são carbonatos que ao se depositarem, obstruem os poros do concreto. A frente de carbonatação se desenvolve inevitavelmente em direção à armadura dando início à corrosão. A corrosão promove o aumento das tensões internas da armadura sobre o concreto que expulsa o cobrimento das mesmas, causando patologia no concreto. Para evitar a corrosão das armaduras, deve-se obedecer aos processos de dosagem do concreto para cada situação a que a estrutura estiver submetida, além de adotar o cobrimento mínimo para as armaduras exigido em normas.

A corrosão das armaduras em concreto armado, pelo efeito da carbonatação, pode ser classificada como um caso típico de corrosão eletroquímica generalizada. Uma menor porosidade do concreto pode inibir a corrosão de armaduras por carbonatação.

O processo de carbonatação é muito lento e está relacionado às condições ambientais e às características da mistura do concreto (RAMEZANIANPOUR *et al. apud* BARIN, 2008). Ou seja, a velocidade de carbonatação aumenta consideravelmente com o aumento da concentração de CO₂ presente no meio ambiente em contato com a superfície de concreto. Assim quanto maior o gradiente de concentração entre o meio externo e o interior do concreto, maior será a velocidade de penetração de CO₂ e, conseqüentemente, maior a frente de carbonatação (Cafange, 2011).

Pauletti (2009) em seu estudo de doutorado verificou que muitas pesquisas são conduzidas com percentuais de CO₂ bastante elevados (maiores que 50%) muito superiores aos que as estruturas estão submetidas em situações normais de exposição. Ainda mais, para todos esses estudos sobre o tema há falta de informações sobre as diferenças entre o comportamento do fenômeno entre os percentuais de CO₂ mais baixos (5-10%) e mais altos (maiores que 50%).

Segundo Cafange, (2011), o projeto da norma PrEN 13295 (2000) do Comitê Europeu para Normalização citado por Giannotti (HELENE, 2007), para a determinação da resistência à carbonatação de argamassas de reparo de concreto, teores ainda menores de CO₂ são sugeridos. A comissão sugere que a carbonatação seja feita em atmosfera contendo 1% de CO₂ à 21 ±2°C, cuja justificativa é o desenvolvimento de produtos de reação similares aos produtos hidratados do cimento exposto a uma atmosfera com teor de CO₂ de 0,03% .

Uemoto e Takada (1993), verificando a influência do teor de CO₂ no avanço da frente de carbonatação, submeteram espécimes de concreto a concentrações de CO₂ de 0,07%

(ambiente natural interno), 1% e 10% (teste acelerado), sob temperatura e umidade controladas ($T=20^{\circ}\text{C}$ e $UR=55\%$). Conforme apresenta o gráfico da Figura 3-1, o aumento do teor de CO_2 elevou a velocidade de carbonatação dos concretos.

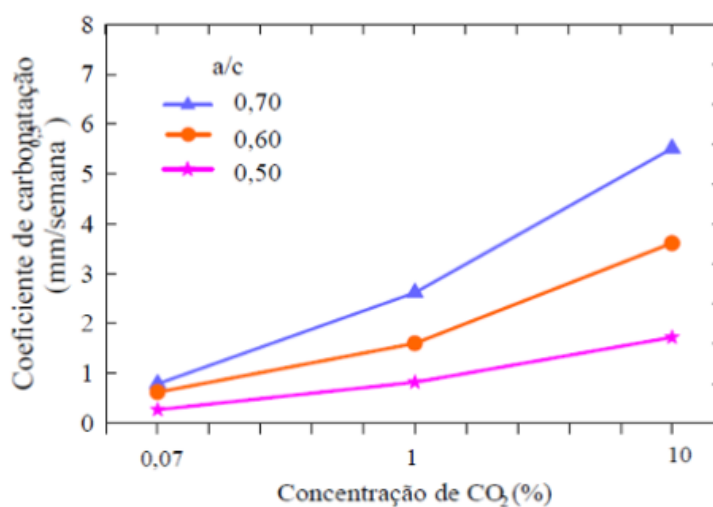


Figura 3-1: Influência do teor de CO_2 no coeficiente de carbonatação.
Fonte: UEMOTO; TAKADA (1993).

Segundo Cafange, (2011), a lógica sempre é imaginar o ingresso progressivo do CO_2 do meio externo para o concreto, sem ponderar o fato da disponibilidade de CO_2 já no interior do concreto, de forma análoga como se pensa para cloretos.

3.3.1 Mecanismo de Carbonatação

A rede de poros do concreto em fase de endurecimento é formada por uma solução composta principalmente pelos íons OH^- , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ e SO_4^{2-} , o que garante a alta alcalinidade do concreto. A película passivadora, que protege o aço da corrosão, é uma camada de óxido muito aderente, formada devido ao pH elevado e à presença do oxigênio no concreto. Helene, citado por Barin (2008) afirma que o cobrimento do concreto tem a finalidade de proteger fisicamente a armadura e propiciar um meio alcalino elevado que evite a corrosão do aço. A microestrutura do concreto deve ser menos permeável possível pois é através dela que ocorre a difusão dos gases estando a sua intensidade diretamente relacionada com a rede de poros do concreto. O principal mecanismo responsável pela penetração do CO_2 no concreto é a difusão.

A alcalinidade do concreto deriva das reações de hidratação dos silicatos de cálcio (C_2S e C_3S) que liberam certa porcentagem de hidróxido de cálcio (CH) a qual pode chegar a 25% do total dos compostos hidratados, presentes na pasta (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A carbonatação é a ação do CO_2 em presença de umidade com outros gases ácidos presentes na atmosfera, como o SO_2 e o H_2S que reagem nas superfícies expostas do concreto formando o carbonato de cálcio (CaCO_3) sólido. Como o CaCO_3 formado possui um volume maior que o do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ há uma redução na porosidade do concreto. Segundo Barin (2008), apesar da carbonatação elevar a resistência, através da diminuição da porosidade, seu efeito reduz o pH do sistema, pelo consumo de hidróxido de cálcio, e acelera o processo de corrosão das armaduras, no concreto armado (SILVA, 2002). Como a carbonatação se inicia na superfície do concreto e se projeta para o interior, a carbonatação promove um ganho na dureza e permeabilidade do concreto. Um fator positivo da carbonatação é o fato da água liberada durante a reação promover a hidratação do cimento ainda não hidratado no concreto o que consequentemente aumenta a resistência do mesmo.

Segundo Barin (2008), além do hidróxido de cálcio, outros álcalis do cimento, com o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH), também estão sujeitos a carbonatação. O hidróxido de cálcio é menos solúvel que o hidróxido de sódio e o hidróxido de potássio; logo, é encontrado na solução dos poros do concreto, normalmente na forma de cristais, enquanto que os outros estão dissolvidos na forma de íons. Como a solubilidade do CH depende da concentração de OH^- na solução intersticial, a reação de carbonatação começa através dos álcalis NaOH e KOH , passando a seguir ao CH (HELENE, 1993). Os cristais de CH são dissolvidos na água e, sob o efeito desta, deslocam-se e se depositam nos vazios capilares, onde se dá a carbonatação, resultando numa retração dos espaços deixados pelo transporte de CH.

De acordo com Neville citado por Barin (2008), quando o concreto tem como aglomerante apenas o cimento Portland, interessa apenas a carbonatação do hidróxido de cálcio. Porém quando este se esgota, o processo se instala sobre os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que formam o carbonato de cálcio (CaCO_3) e o gel de sílica, o qual possui poros maiores que $100\mu\text{m}$, tornando o concreto mais suscetível a carbonatação posterior. A velocidade de carbonatação depende da concentração do CO_2 , do consumo de aglomerantes (cimento + adição mineral), do teor de umidade do concreto e da umidade relativa do ar.

Segundo Cafange (2011), a umidade relativa do ambiente é outra variável importante relacionada à carbonatação, uma vez que influencia a umidade interna do concreto ou grau de saturação dos poros. Para ocorrer o processo de carbonatação é necessário que os poros

existentes no concreto não estejam nem saturados nem secos. Necessita-se de certa quantidade de ar para que o CO_2 possa difundir-se pelos poros, mas também necessita-se de quantidade suficiente de água para que haja a solubilização do CO_2 e do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ imprescindíveis para a ocorrência da carbonatação. Como a difusão do CO_2 em meio líquido é mais lenta do que em meio gasoso, na ordem de 10^4 vezes menor (KAZMIERCZAK, 1995), em meios saturados, a difusão do CO_2 praticamente não ocorre.

O concreto absorve com facilidade a umidade do ambiente, mas em compensação seca lentamente. Quando a umidade externa é constante, chaga-se a estabelecer um equilíbrio entre o conteúdo de umidade do interior do concreto e a umidade relativa ambiente. Porém quando a umidade exterior oscila, o interior do concreto pode não acompanhar as trocas com a mesma velocidade. Conseqüentemente, só a camada externa da estrutura é que mantém o equilíbrio com a umidade relativa exterior (FIGUEIREDO, 2004).

Segundo Cafange (2011), o transporte de substâncias gasosas através do concreto será sensivelmente afetado pela umidade dos poros. Uma alta umidade irá bloquear o fluxo de gás, mas incrementará o fluxo de substâncias dissolvidas. Da mesma forma, a água capilar livre que evapora em decorrência da secagem tem uma grande influencia no fluxo de gás no concreto, pois a permeabilidade irá aumentar à medida que o concreto secar (SUGIYAMA *apud* REGATTIERI, 1998).

A mudança na estrutura do espaço poroso pode ser feita tanto por meio da diminuição do volume total de vazios como também com modificações na distribuição de tamanho de poros. O desenvolvimento do espaço poroso do concreto não depende somente da sua composição, mas também, das condições de cura e de exposição.

A carbonatação produz uma redução na porosidade e no tamanho dos poros. A porosidade decresce com o tempo por causa dos produtos das reações químicas de hidratação e carbonatação preencherem os poros.

Segundo Cafange (2011), a temperatura é uma das variáveis relacionadas ao meio ambiente que pode influenciar o processo de carbonatação. Dependendo do valor da temperatura ao qual o concreto é exposto, há uma tendência à aceleração das reações de hidratação do cimento, melhorando as condições microestruturais ou, no caso de ser excessivamente alta, causar a microfissuração do material e acelerar o ingresso dos agentes agressivos no concreto

(GIANOTTI; HELENE, 2007 *apud* CAFANGE, 2007). Mas, segundo Parrot (1990), a velocidade de carbonatação não sofre aceleração direta para acréscimo de temperatura, entre valores de 20°C e 45°C.

A temperatura funciona como catalisador da taxa de corrosão da armadura, não podendo a mesma ser desprezada ao se estudar a durabilidade do concreto.

A Figura 3-2 refere-se à medida de carbonatação realizada por Chang e Chen (2006), segundo Cafange (2011). Os autores utilizaram fenolftaleína a 1%, em corpos de prova cilíndricos, e um método semelhante foi utilizado nesta pesquisa. A profundidade de carbonatação média “xp” abrange as regiões menos coloridas pela fenolftaleína e foi medida em três pontos perpendiculares às duas bordas da face partida, em que as faces foram borrifadas logo após a fratura. As medidas foram realizadas após 24 horas da aspersão da fenolftaleína. Já a Figura 3-2 b) mostra a medida de carbonatação realizada por Gonen; Yazicioglu (2007) *apud in* Cafange 2011, de acordo com a metodologia recomendada pela RILEM CPc –18.

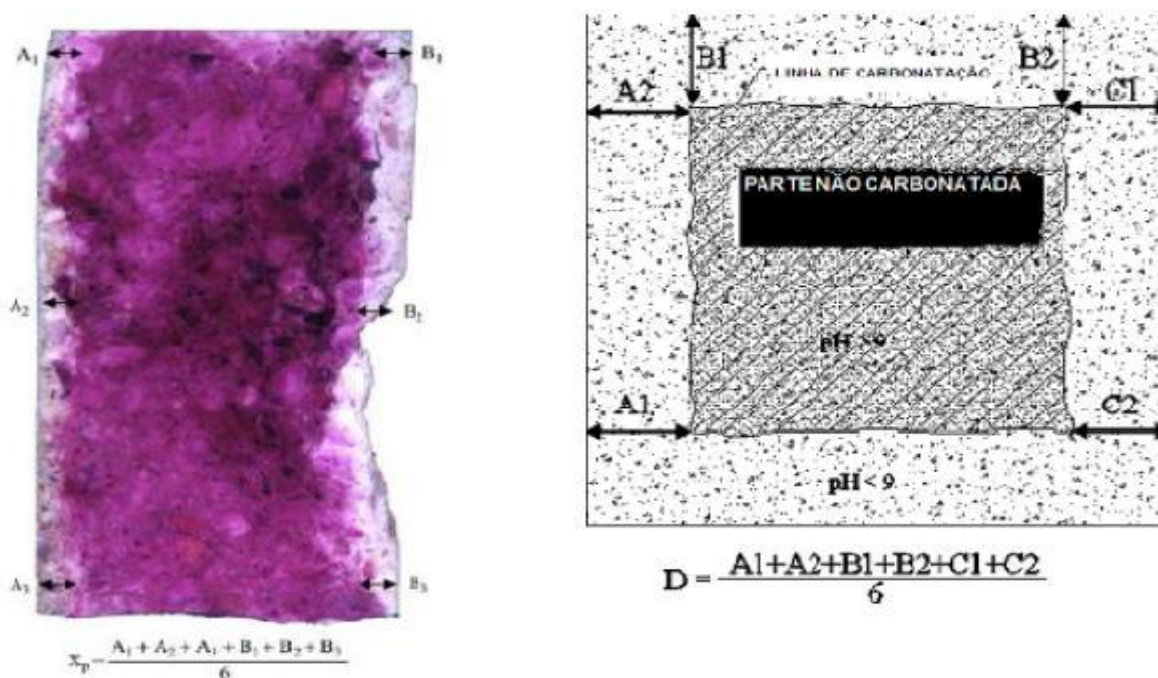


Figura 3-2: Medida de profundidade de carbonatação.

Fonte: a) CHANG; CHEN (2006), b) GONEN; YAZICIOGLU (2007) apud Cafange (2011)

Cafange (2011), Pauletti (2004) e Kulakowski (2002) realizaram suas experiências para medir a profundidade de carbonatação utilizando o método de análise de imagem. Com o corpo de prova fotografado, as medidas podem ser conferidas quantas vezes se achar necessário. Há, ainda, uma maior precisão nas medidas, pode-se melhorar a média dos resultados, utilizando o

maior número de medidas por face ou determinando a integral da área carbonatada e os erros oriundos do desgaste do operador são descartados.

A Figura 3-3 representa o método utilizado por Pauleti (2004), que consiste na aspersão de fenolftaleína em amostras fraturadas e as mesmas foram fotografadas por uma câmara digital. As fotos foram obtidas após cerca de 1 hora após a solução de fenolftaleína ter sido aspergida, antecipando o prazo de 24 horas do procedimento do RILEM 28. Segundo Caffange (2011) é possível que a autora tenha adotado um prazo mais precoce, pois a coloração rosa carmim de áreas não carbonatadas das amostras podem perder a intensidade e dificultar a visualização para medição, conforme o concreto.

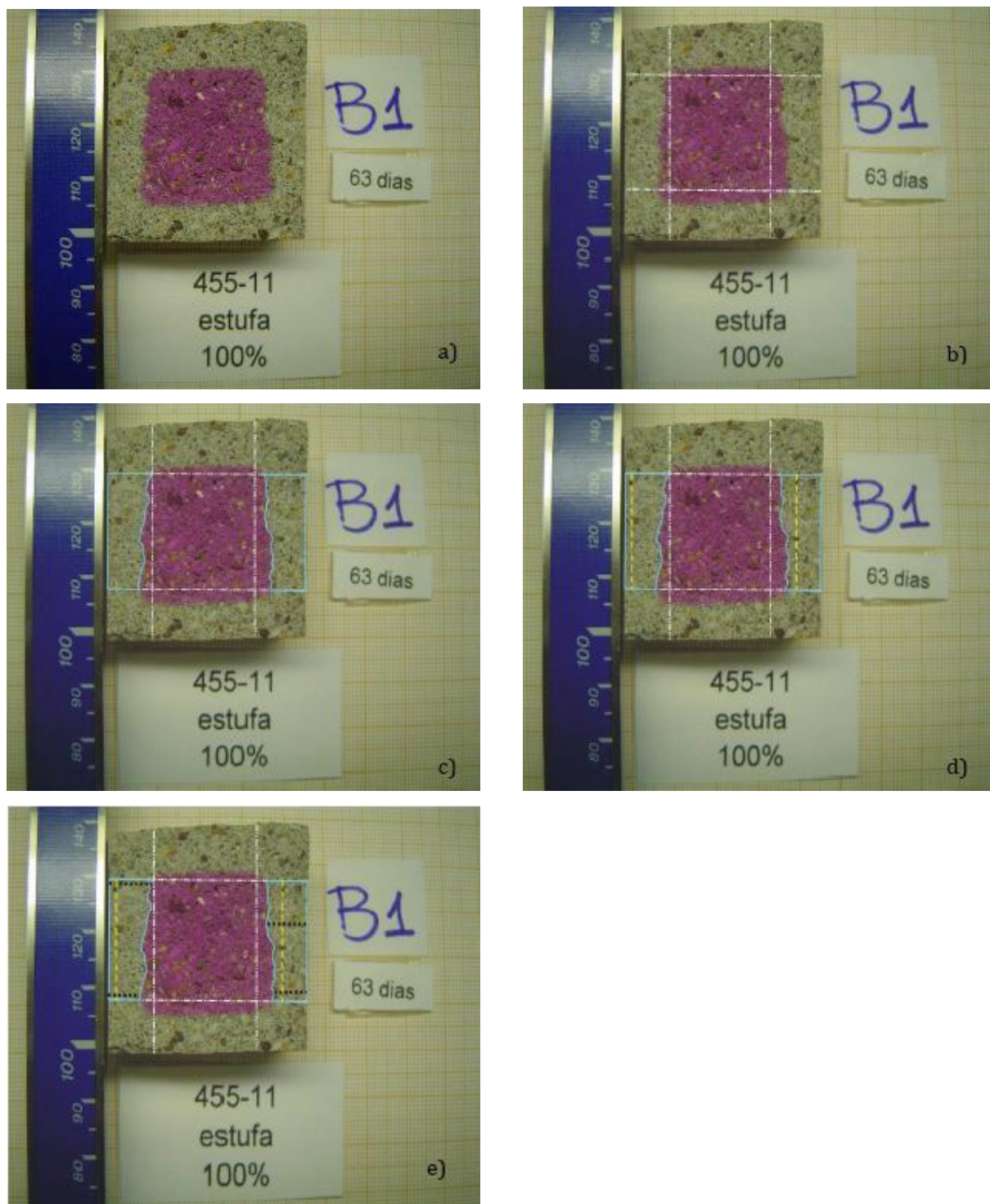


Figura 3-3: Imagens de a) a e) retratam o método de análise adotado por Pauleti (2004). As medidas da maior e menor profundidade de carbonatação para cada uma das laterais estão representadas por linhas pontilhadas.

Fonte: Cafange (2011).

Salmão *et al.* (2008) realizaram ensaios de compressão axial e de carbonatação em corpos de prova de várias idades. Dentre seus resultados os autores obtiveram, aos 28 dias, a resistência

à compressão axial de 23,6 MPa para os concretos utilizando cimento CII-E, e de 19 MPa para o concreto utilizando o cimento CIII. Para o ensaio de carbonatação, a profundidade média encontrada por estes autores foi de 0,399 cm no caso do uso do cimento CII-E e de 0,574cm para o cimento CIII. Em sua pesquisa, concluíram que somente na idade de 7 dias foi notada diferença significativa entre as profundidades de carbonatação para o caso do cimento CII-E com maior reserva alcalina, portanto, com menor profundidade de carbonatação.

4 METODOLOGIA

4.1 Caracterização dos materiais

Os traços foram moldados utilizando dois tipos de cimento, um considerado normal pois atinge a sua resistência esperada aos 28 dias, o CPIII, e outro de alta resistência inicial, o CPV.

Os traços utilizados se diferenciam pelo tipo de agregado graúdo (brita 0 e brita 1) e pela presença de metacaulim como adição, conforme Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Composição dos concretos estudados.

Traço	Resistência (MPa)	Cimento		Metacaulim	Areia	Brita 0	Brita 1
		CPIII	CPV				
Traço 1	30	X			X		X
Traço 2		X		X	X		X
Traço 4				X		X	X
Traço 5				X	X	X	X
Traço A			X			X	X
Traço B			X		X	X	X
Traço 7	40	X			X	X	X
Traço 8		X		X	X	X	X
Traço 10				X	X	X	X
Traço 11				X	X	X	X

Os traços utilizados estão apresentados na Tabela 4-2, sendo a ordem: cimento: adição: areia:brita 1: brita 0. Os traços que não possuem adição ou brita 0 estão omitindo este valor. A adição utilizada de metacaulim substituiu 8% da massa de cimento.

O cimento CPIII é um cimento com porcentagens de escória de alto forno e apresenta os valores de resistência à compressão esperados apenas em idades mais avançadas, como de 28 dias. O cimento CPV é utilizado quando se requer alta resistência à compressão principalmente para concretos que necessitam de desforma rápida, e alta resistência inicial aproximadamente aos 7 dias.

Para todos os traços foi utilizado o aditivo Visscocrete 5700 da SiKa um aditivo superplastificante de alto desempenho. Segundo o manual do fabricante o aditivo atua por diferentes mecanismos, através dos efeitos de absorção superficial e separação estérica nas partículas do cimento e no processo de hidratação do cimento.

Tabela 4-2: Traços dos concretos estudados.

	Resistência (MPa)	Cimento	Traço	Relação a/agl.
Traço 1	30	CPIII	1:2,72:2,69	0,50
Traço 2		CPIII	1:0,08:2,72:2,69	0,48
Traço 4		CPV	1:2,72:2,69	0,40
Traço 5		CPV	1:0,08:2,72:2,69	0,47
Traço 7	40	CPIII	1:2,48:2,3:0,3	0,48
Traço 8		CPIII	1:0,08:2,48:2,72:0,3	0,47
Traço 10		CPV	1:2,48:2,3:0,3	0,48
Traço 11		CPV	1:0,08:2,48:2,72:0,3	0,40
Traço A	30	CPIII	1:2,72:2,69	0,50
Traço B		CPIII	1:0,08:2,72:2,69	0,48

4.2 Ensaio de Resistência à Compressão

Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram armazenados em câmara úmida onde permaneceram até o rompimento. Os corpos de prova numerados e datados foram rompidos com 7, 28 e 63 dias após a data da moldagem. O equipamento utilizado para o rompimento foi uma máquina Emic PC200, que fornece a carga de ruptura em kgf e a tensão de ruptura em MPa.

4.3 Ensaio de Absorção Capilar

O ensaio de absorção capilar foi realizado seguindo os padrões utilizados pelo Departamento de Engenharia de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, após verificar sua padronização em diversos trabalhos.

O ensaio de absorção capilar consistiu em se utilizar os corpos de prova cilíndricos de concreto nas dimensões 10x20 cm, secos em estufa por duas horas, para determinar o seu peso inicial. Após a pesagem, os corpos de prova foram imersos em uma lâmina de 3 cm de água e pesados a cada intervalo de 1 hora, 2 horas, 4 horas e 24 horas a partir do momento de

imersão das amostras em água, tomando o cuidado de secar levemente com papel toalha as amostras antes de cada pesagem para retirada do excesso de água. A absorção é então calculada, subtraindo o peso inicial dos valores das pesagens. Com isto tem-se o valor da absorção, dado em massa por unidade de área (g/m^2).

4.4 Ensaio de Carbonatação do Concreto

Com base nas referências bibliográficas o ensaio de carbonatação foi realizado após um período de cura mínimo de 90 dias da confecção dos corpos de prova. Após a retirada dos corpos de prova da câmara úmida, os mesmos foram levados à uma estufa, a 200°C , por 24 horas para homogeneização da umidade. Após este período, os corpos de prova foram levados à câmara de carbonatação que encontrava-se à uma temperatura de $25^\circ\text{C} \pm 2$ com uma porcentagem de 5% de CO_2 , e os corpos de prova permaneceram na mesma por 30 dias.

Após os 30 dias, os corpos de prova foram retirados da câmara de carbonatação. Após 24 horas os mesmos foram cortados ao meio e foi aspergida uma solução de água destilada e fenolftaleína, aguardando 1 hora para iniciar os trabalhos. Todos os corpos de prova foram colocados sobre um papel milimetrado e fotografados. Segundo Cascudo (2005), a aspersão do indicador fenolftaleína foi feita em período inferior à 1 minuto após a fratura, pois se a superfície for molhada ou apresentar excesso de poeira, pode ocorrer alteração no resultado.

Para obter os valores de profundidade de carbonatação, as fotografias foram tratadas usando-se o programa AUTOCAD, e seu contorno refeito. Após este procedimento, foram medidos os valores de profundidade de carbonatação em três pontos em cada lateral dos corpos de prova, conforme Figura 4-1. Foi criada uma planilha onde foram registrados os valores obtidos no desenho para a profundidade de carbonatação e foi feita uma regra de três com os valores para se obter a profundidade real.

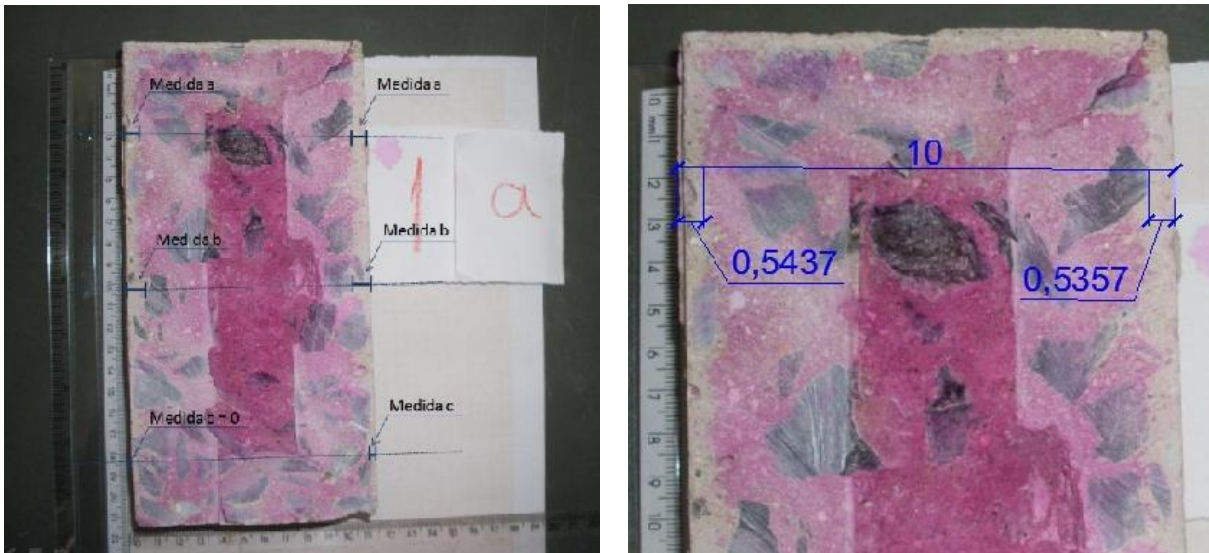


Figura 4-1: Medida de profundidade de carbonatação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Compressão do concreto

Os valores de resistência à compressão aos 28 dias foram calculados com base na Tabela 5-1 e são apresentados na Tabela 5-2.

Tabela 5-1: Valores aproximados de resistência à compressão .

Idade do concreto (dias)		3	7	28	90	360
Cimento	Normal – CPIII	0,40	0,65	1,0	1,20	1,35
	CPV	0,55	0,75	1,0	1,15	1,20

Fonte: SILVA *et al.* (2007)

A Tabela 5.1, representa uma proporcionalidade dos valores esperados de resistência à compressão, por exemplo a resistência calculada para projeto é esperada ser atingida aos 28 dias após a moldagem da estrutura por isso consideramos o valor como 1,0, se quisermos ter a certeza que a estrutura atingirá a resistência calculada e não tivermos tempo suficiente para esperar 28 dias, ao rompermos o corpo de prova aos 3 dias podemos saber que a resistência encontrada será 0,40 do valor de projeto, para o cimento CPIII, e se este valor for inferior podemos condenar a estrutura antes dos 28 dias de projeto.

Em alguns traços, o rompimento aos 28 dias foi realizado, o que serviu de base para a validação de valores calculados pela tabela de SILVA *et al.* (2007).

Os valores de resistência à compressão ficaram muito abaixo dos valores esperados de 30MPa e 40MPa, conforme Tabela 5-2. Acredita-se que esta discrepância tenha se dado devido à problemas de validade do aditivo usado pois todas as outras variáveis do concreto como os agregados graúdo e miúdo utilizados, a potabilidade da água, o número de golpes por camada durante a moldagem dos corpos de prova, e o moldador foram criteriosamente acompanhados.

Tabela 5-2: Valores de resistência à compressão aos 28 dias.

	Cimento	Traço	Relação a/agl.	Idade		
				7 dias (MPa)	28 dias (rompimento) (MPa)	28 dias (calculado) (MPa)
Traço 01	CPIII	1:2,72:2,69	0,50	7	12	10,77
Traço 02	CPIII	1:0,08:2,72:2,69	0,48	6	9	9,23
Traço 04	CPV	1:2,72:2,69	0,40	9	12	13,85
Traço 05	CPV	1:0,08:2,72:2,69	0,47	14	16	9,10
Traço 07	CPIII	1:2,48:2,3:0,3	0,48	6	14	9,84
Traço 08	CPIII	1:0,08:2,48:2,72:0,3	0,47	5	10	7,69
Traço 10	CPV	1:2,48:2,3:0,3	0,48	10	15	15,38
Traço 11	CPV	1:0,08:2,48:2,72:0,3	0,40	11	16	16,92
Traço A	CPIII	1:2,72:2,69	0,50	9	15	13,84
Traço B	CPIII	1:0,08:2,72:2,69	0,48	14	18	21,54

A resistência à compressão para o cimento CPIII e brita 1 foi menor do que quando se utiliza o cimento CPV. A adição de metacaulim ao concreto também proporcionou uma redução na resistência à compressão para a amostra moldada com cimento CPIII, tanto nas amostras com brita 1 quanto no caso das amostras com brita 0 e 1. Para as amostras 4 e 5, moldadas com cimento CPV, as amostras com adição de metacaulim apresentaram maior resistência à compressão, tanto para as amostras feitas somente com brita 1 quanto para as amostras com brita 0 e brita 1. Para as amostras A e B, moldadas com cimento CPIII, areia, brita 1, a adição de metacaulim ao cimento aumentou a resistência à compressão.

Pode-se observar que os concretos utilizando o cimento CPV (de alta resistência inicial) apresentaram uma resistência superior aos concretos com o cimento CPIII aos 7 dias.

5.2 Absorção Capilar

Os valores obtidos no ensaio de absorção capilar encontram-se na Tabela 5-3 e nas figuras 5-1 a 5-5. De acordo com estes dados, constatou-se que a presença de metacaulim, após 24 horas, resultou em um dos valores mais altos de absorção capilar, de 3410g/m², comprovando a literatura (Barim, 2008) que relata que a absorção capilar ocorre de maneira mais intensa em concretos com adições, visto que o maior valor de absorção do concreto de referência foi de 2590 g/m².

Tabela 5-3: Absorção capilar dos concretos (g/m²) – Massa de Água Absorvida.

Traços		Resistência esperada (MPa)	P0 (g/m ²) (Após 2 horas em estufa)	P1 (g/m ²) (Após imersão por 1 hora)	P2 (g/m ²) (Após imersão por 2 horas)	P3 (g/m ²) (Após imersão por 3 horas)	P4 (g/m ²) (Após imersão por 24 horas)
Traço 1	Ref	30	0	1160,0	1430,0	1480,0	1890,0
Traço 2	Met		0	1650,0	1840,0	1920,0	2470,0
Traço 4	Ref		0	1240,0	1390,0	1490,0	1960,0
Traço 5	Met		0	810,0	920,0	1000,0	1460,0
Traço 7	Ref		40	0	1330,0	1600,0	1720,0
Traço 8	Met	0		1720,0	2040,0	2280,0	3410,0
Traço 10	Ref	0		1170,0	1400,0	6610,0	2590,0
Traço 11	Met	0		830,0	960,0	1050,0	1490,0
Traço A	Ref	30		0	990,0	1230,0	1320,0
Traço B	Met		0	1350,0	1430,0	1890,0	2190,0

Para as amostras moldadas com cimento CPIII, areia e brita 1, a adição de metacaulim aumentou a absorção capilar do concreto. Para as amostras moldadas com cimento CPV, areia e brita 1, a adição de metacaulim reduziu a absorção capilar do concreto. No caso das amostras moldadas com cimento CPIII, areia, britas 0 e 1, a absorção capilar aumentou com a adição de metacaulim. Já no caso das amostras moldadas com cimento CPV, areia, brita 0 e brita 1, a adição de metacaulim reduziu a absorção capilar. A força da capilaridade é inversamente proporcional ao tamanho do poro.

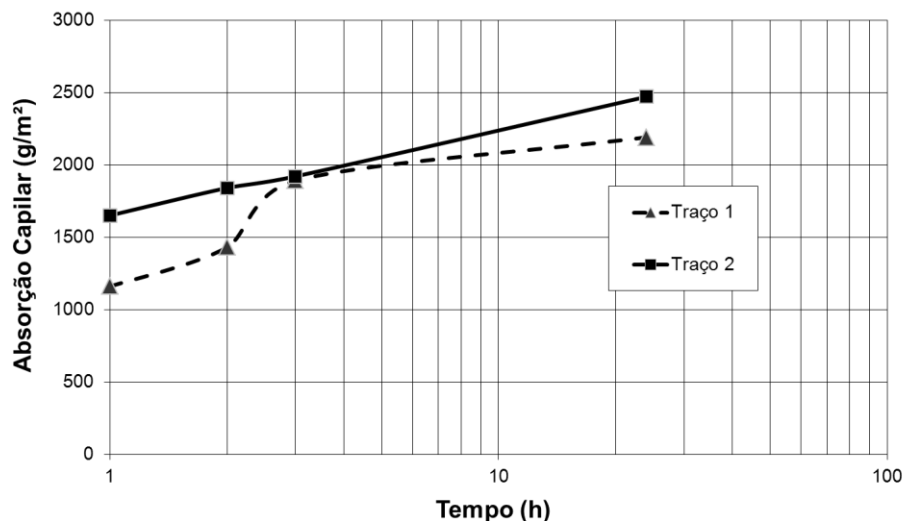


Figura 5-1: Absorção capilar do traço 1, relação a/agl = 0,5 X traço 2 relação a/agl = 0,48.

Para as amostras moldadas com cimento CPIII e brita 1, **Figura 5-1**, as amostras com a adição de metacaulim, a absorção capilar aumentou com o tempo a uma taxa aproximadamente constante, se mantendo maior que para as amostras com adição de metacaulim.

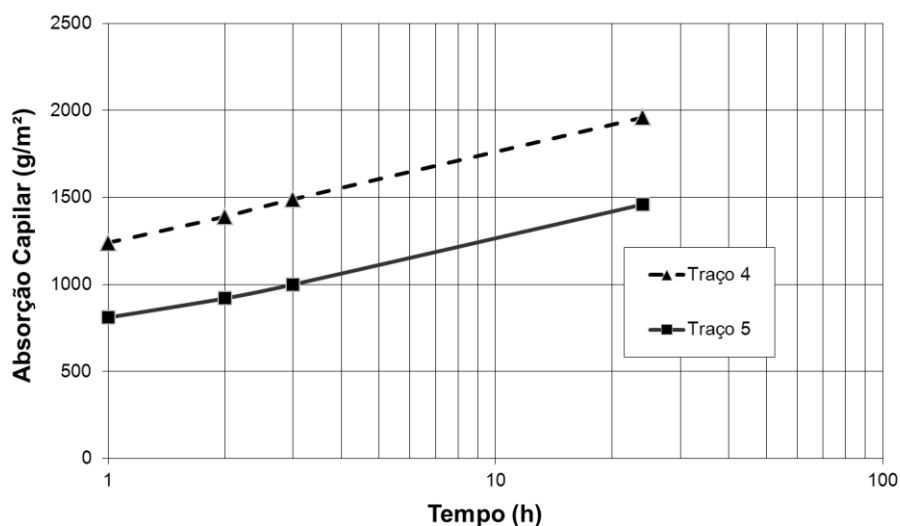


Figura 5-2: Absorção capilar do traço 4, relação a/agl = 0,40 X traço 5 relação a/agl = 0,47.

Para as amostras moldadas com cimento CPV e brita 1, **Figura 5-2** com a adição de metacaulim, a absorção capilar aumentou com o tempo a uma taxa aproximadamente constante, se mantendo maior que para as amostras sem adição de metacaulim.

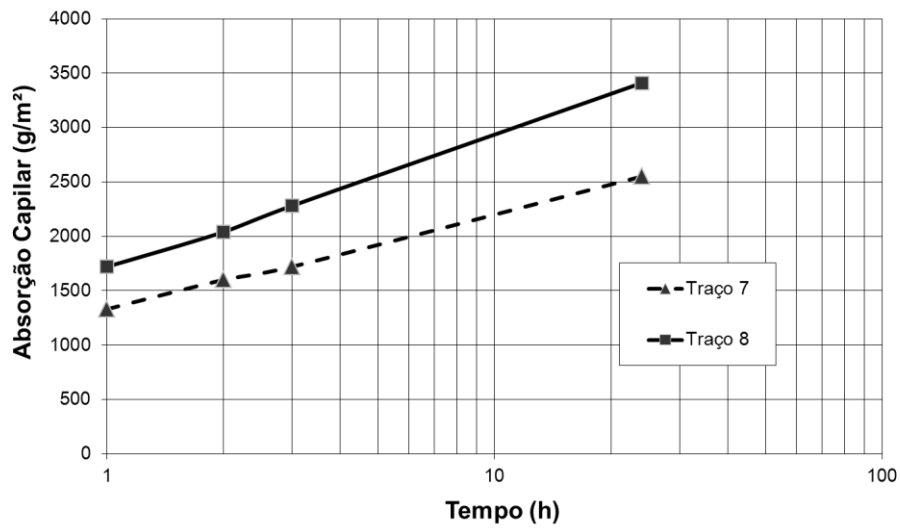


Figura 5-3: Absorção capilar do traço 4, composto por cimento, areia, brita 1 e relação a/c =0,4.

No caso das amostras moldadas com cimento CPIII, e dois tipos de brita, Figura 5-3, a adição de metacaulim aumentou a absorção capilar das amostras para todos os tempos. O metacaulim promove um refinamento dos poros do concreto aumentando a absorção capilar.

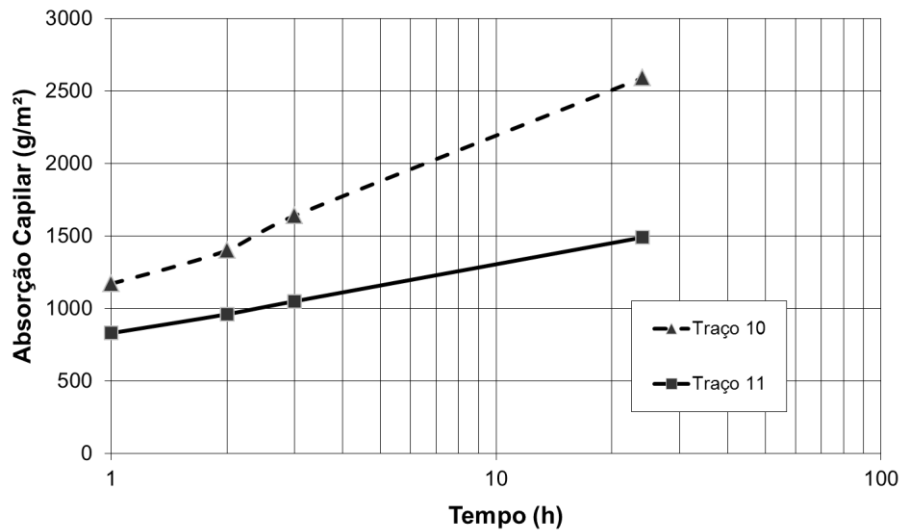


Figura 5-4: Absorção capilar: traço 10 relação a/agl 0,48 X traço 11 relação a/agl 0,40.

No caso das amostras moldadas com cimento de alta resistência inicial, Figura 5-4 as amostras sem adição de metacaulim apresentaram maiores valores de absorção capilar, sendo observado um aumento linear na taxa de crescimento da absorção capilar com o tempo para ambas, mas para a amostra de referencia o crescimento se mostrou bem acentuado.

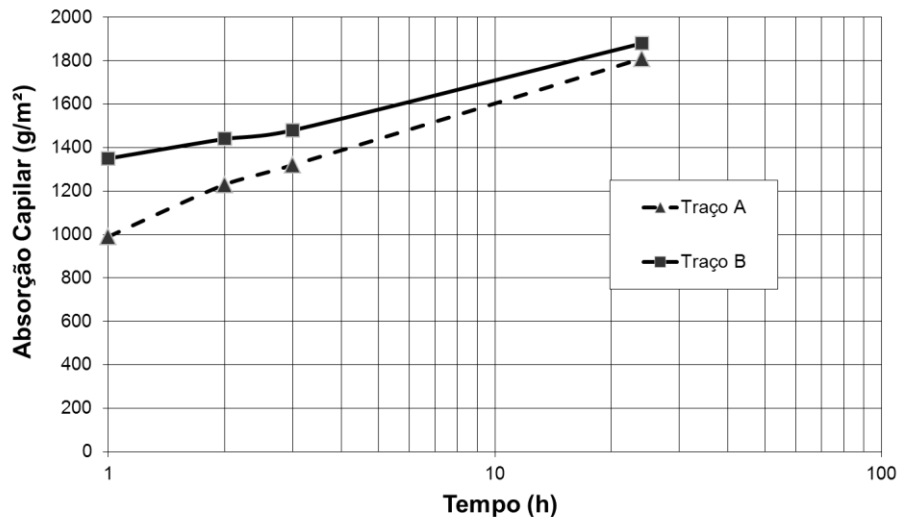


Figura 5-5: Absorção capilar: traço A relação a/agl 0,50 X traço B relação a/agl 0,48.

A Figura 5-5 para as amostras moldadas com cimento CPIII e brita 1, a adição de metacaulim aumentou a absorção capilar da argamassa. Para ambas as amostras sem e com adição de metacaulim, a taxa de crescimento da absorção capilar aumentou linearmente com o tempo, sendo que a amostra com metacaulim mostrou maior absorção capilar.

A Tabela 5-4 apresenta as constantes A e B e o coeficiente de determinação (R^2) das equações de regressão, também conhecidas como curva de Abrams de cada traço estudado. Nesta equação Abs significa o valor de absorção capilar e x a resistência à compressão. Na Tabela 5-5 estão representados os valores de absorção capilar para as resistências esperadas 30MPa e 40 MPa e as respectivas relações a/agl.

$$\text{Abs} = A/B^x \quad \text{Equação 6}$$

A Tabela 5-5 representa os valores de absorção capilar calculados através dos coeficientes A e B da Equação de Abrams e os valores encontrados nos ensaios.

Tabela 5-4: Coeficiente da Curva de Abrams para Absorção Capilar dos traços pesquisados.

Traço	Constantes da Equação de Abrams Absorção Capilar		
	A	B	R ²
Traço 01	1779,8780	0,9806	0,5773
Traço 02	2220,7490	0,9854	0,9058
Traço 04	1682,4390	0,9834	0,8972
Traço 05	1101,5790	0,9781	0,9260
Traço 07	1866,6750	0,9768	0,8921
Traço 08	2414,3850	0,9754	0,8910
Traço 10	1652,4260	0,9711	0,9000
Traço 11	1146,1920	0,9788	0,8969
Traço A	1426,3870	0,9797	0,8171
Traço B	1763,2250	0,9872	0,9613

Tabela 5-5: Valores de absorção capilar para os traços estudados pela Equação de Abrams e medidos e suas respectivas relações a/agl.

Traço	Resistência a compressão esperada (MPa)	A/agl	Absorção Capilar calculada (g/m ²)	Absorção Capilar medida (g/m ²)
Traço 01	30	0,50	3204,45	2190,00
Traço 02	30	0,48	3451,57	2470,00
Traço 04	30	0,40	2776,62	1960,00
Traço 05	30	0,47	2137,76	1460,00
Traço 07	40	0,48	4777,62	2550,00
Traço 08	40	0,47	6536,90	3410,00
Traço 10	40	0,48	5334,78	2590,00
Traço 11	40	0,40	2697,86	1490,00
Traço A	30	0,50	2638,30	1810,00
Traço B	30	0,48	2596,44	1880,00

Comparando os traços referência com os com adição de metacaulim, para a resistência esperada de 30 MPa, observou-se que o traço 2, apresentou o maior valor de absorção capilar, 2470,00g/m². Para a resistência esperada de 40 MPa, observou-se que o traço 8, apresentou o maior valor de absorção capilar, 3410,00g/m². Para ambos os valores de resistência, os

concretos com adição de metacaulim e com um agregado graúdo (somente brita 1) são os que apresentaram maior valor de absorção capilar. Isto pode ocorrer devido ao acréscimo de brita 0 diminuir o número de vazios no concreto.

Comparando os traços de referencia observou-se que o traço 10, que possui relação a/c de 0,48, foi o que apresentou a absorção capilar 32% superior as demais. Comparando os traços com a adição de metacaulim observou-se que o traço 8, que possui relação a/c de 0,47, foi o que apresentou a absorção capilar 133,5% superior a das demais. Mais uma vez foi comprovado o resultado encontrado por Barin (2008) de que a absorção capilar ocorre de maneira mais intensa em concretos com adições.

Para o traço 2 onde a resistência à compressão esperada era de 30MPa e a relação água/cimento foi de 0,48, encontrou-se uma alta absorção de água inicial, de 1650 g, tendo o valor após 24 horas aproximado dos 2500 g. Já para o traço 5 onde a resistência à compressão esperada era de 40MPa e a relação água/cimento era de 0,47, a absorção de água nas primeiras horas foi a metade (800 gramas), tendo elevação linear nas primeiras 24 horas chegando a valores inferiores a 2000 gramas.

Barin (2008), que utilizou cimento branco e escória em diversas porcentagens, observou que as amostras que apresentaram maiores valores de absorção capilar foram de misturas com adição de escória, e os dois menores valores são das misturas sem adição de escória com as relações a/agl 0,42 e 0,55. Já no presente trabalho, pode-se concluir que a presença de metacaulim proporcionou maiores valores de absorção capilar bem como a presença de dois tipos de agregados graúdos (brita 0 e brita 1) afetaram esta propriedade, pois, o maior valor encontrado para a absorção capilar foi em concreto que possuía adição de metacaulim e dois tipos de agregados.

Para amostras com cimento CPIII, a adição de metacaulim refina o sistema de poros do concreto, o que leva a uma diminuição da dimensão de poros e melhora a uniformidade da distribuição de tamanho dos mesmos (Badogiannis e Tsivilis, 2009). O refinamento dos poros aumenta a força de capilaridade, aumentando a absorção capilar, como observado.

O cimento CPV tem a particularidade de obter alta resistência nos primeiros dias de aplicação. A elevada resistência inicial se deve a obtenção de partículas mais finas na fabricação do cimento o que proporciona uma maior superfície de contato entre o cimento e a água. O

clínquer é o mesmo utilizado para a fabricação do cimento convencional, mas permanece no moinho por mais tempo. A maior finura das partículas do cimento CPV com relação ao cimento convencional proporciona um menor número de vazios, assim o efeito de refinamento dos poros do MK tornar-se menos significativo. A adição de MK pode até ter obstruído os poros finos do concreto e provocado a redução da absorção capilar. Portanto, o cimento CPV com adição de MK mostra uma redução na absorção capilar e é menos susceptível à penetração de agentes agressivos. A absorção capilar, que ocorre em amostras de cimento CPV, está diretamente relacionada com o refinamento dos poros. Além disso, as reações pozolânicas em amostras de cimento CPV com MK ocorrem mais rapidamente do que em amostras de cimento CPIII gerando uma maior compacidade e impedindo a absorção capilar. O SiO₂ de MK reage com o hidróxido de cálcio do cimento gerando um hidróxido de silicato de cálcio, estringita (C₂ASH₈), e hidróxido tetra cálcio de alumínio (C₄AH₁₃), as principais fases formadas à temperatura ambiente. Estes produtos hidráulicos alteram a estrutura de poros das massas de cal e de cimento e melhoram significativamente a sua resistência ao transporte de água (Gameiro et al., 2012).

5.3 Carbonatação

A Tabela 5-6 apresenta os valores de profundidade de carbonatação do concreto obtidos após os corpos de prova permanecerem por 30 dias dentro da câmara de carbonatação.

Tabela 5-6: Profundidade de carbonatação do concreto.

	Cimento	Traço		Resistência esperada (MPa)	Carbonatação do concreto após 30 dias (mm)	Relação a/agl
Traço 1	CPIII	1:2,72:2,69	Ref	30	0,44	0,50
Traço 2	CPIII	1:0,08:2,72:2,69	Met		1,14	0,48
Traço 4	CPV	1:2,72:2,69	Ref		0,08	0,40
Traço 5	CPV	1:0,08:2,72:2,69	Met		0,32	0,47
Traço 7	CPIII	1:2,48:2,3:0,3	Ref	40	0,16	0,48
Traço 8	CPIII	1:0,08:2,48:2,72:0,3	Met		0,58	0,57

Traço 10	CPV	1:2,48:2,3:0,3	Ref		0,06	0,40
Traço 11	CPV	1:0,08:2,48:2,72:0,3	Met		0,00	0,48
Traço A	CPIII	1:2,72:2,69	Ref	30	0,00	0,50
Traço B	CPIII	1:0,08:2,72:2,69	Met		0,34	0,48

Pode-se observar, pela Tabela 5-6 que, para praticamente todos os traços, a profundidade de carbonatação é maior quando há a presença de adição de metacaulim em substituição a parte da massa de cimento. Nos traços onde há a presença de dois agregados graúdos, brita 0 e brita 1, pode-se observar que a profundidade de carbonatação é inferior às que só possuem um tipo de agregado, isto pode ser explicado devido ao maior preenchimento de vazios. A combinação de dois tipos de agregados proporcionou menor profundidade de carbonatação.

Com base na permeabilidade do concreto que é mencionada como a facilidade com a qual os fluidos, tanto gases como líquidos, podem ingressar no interior do concreto (NEVILLE,1997) pode-se perceber que o concreto dos traços 10 e 11 sem adição e com adição de metacaulim respectivamente, e ambos com dois agregados graúdos são os que possuem menor profundidade de carbonatação, e menor permeabilidade, dificultando a entrada de agentes externos para o interior do concreto.

De acordo com Gisseler *et al.* (1995), cimentos com menor resistência inicial levam gradualmente a maiores profundidades de carbonatação do que cimentos de alta resistência inicial. Este resultado foi obtido no presente trabalho; a maior profundidade de carbonatação encontrada foi a do traço 2 utilizando o cimento CPIII, que possui menor resistência inicial em relação ao outro cimento utilizado o CPV, de alta resistência inicial.

A adição de metacaulim proporciona um aumento no coeficiente de carbonatação. Para o traço 1, com cimento de resistência de 30MPa, somente com brita 1, observou-se um acréscimo de 259% na profundidade de carbonatação ao se acrescentar a adição de metacaulim. Para as amostras fabricadas com cimento de resistência esperada de 40MPa, utilizando somente brita 1, foi observado um acréscimo de 400% na profundidade de carbonatação com a adição de metacaulim. Ao se utilizar dois tipos de agregados graúdos, brita 0 e brita 1, para o cimento de resistência esperada de 30MPa, observou-se um acréscimo

de 362,5% na profundidade de carbonatação ao se adicionar metacaulim, enquanto que para as amostras com resistência esperada de 40MPa, não ocorreu carbonatação.

Na pesquisa de Barin (2008), utilizando cimento branco e adição de escória de alto forno foi observado que os coeficientes de carbonatação cresceram à medida que o teor de adição foi aumentado. Houve também um aumento do coeficiente de carbonatação ao se acrescentar ativador químico, o que indica que apesar de promover melhorias na estrutura dos poros, tornado-a mais densa e compacta, o uso de adições minerais consome o hidróxido de cálcio nas reações pozolânicas, e com isto, o pH do concreto é rebaixado a níveis que permitem a instalação do processo de carbonatação.

Segundo Barin (2008), Sperb (2003), Stumpp (2003), Costa et al (2005) e Dalla Lama (2005), em suas pesquisas sobre carbonatação, as profundidades carbonatadas aumentaram com o aumento da relação a/agl e do teor de adição. Na presente pesquisa, não foi observado o aumento da profundidade de carbonatação em relação ao aumento da relação a/agl, visto que em todos os traços tentou-se manter a relação a/agl de 0,50 e como em todos os traços o teor de adição não foi alterado, este fato não foi verificado.

Nesta pesquisa, pode-se verificar que, apesar da adição de metacaulim ter aumentado a profundidade de carbonatação, a resistência a compressão esperada não pode ser um parâmetro para análise visto que os valores estimados de 30MPa e 40MPa não foram obtidos.

Para verificar a reprodutibilidade dos resultados, os traços 1 e 2 foram moldados novamente e observou-se que a profundidade de carbonatação com adição de metacaulim foi 30% superior ao traço de referência, confirmando que a adição de metacaulim contribuiu para o aumento da profundidade de carbonatação.

6 CONCLUSÕES

A adição de metacaulim ao concreto proporcionou uma redução na resistência à compressão para a amostra moldada com cimento CPIII, tanto nas amostras com brita 1 quanto no caso das amostras com brita 0 e 1. Para as amostras 4 e 5, moldadas com cimento CPV, as amostras com adição de metacaulim apresentaram maior resistência à compressão, tanto para as amostras feitas somente com brita 1 quanto para as amostras com brita 0 e brita 1.

Para as amostras moldadas com cimento CPIII, areia e brita 1, a adição de metacaulim aumentou a absorção capilar do concreto. Para as amostras moldadas com cimento CPV, areia e brita 1, a adição de metacaulim reduziu a absorção capilar do concreto. No caso das amostras moldadas com cimento CPIII, areia, britas 0 e 1, a absorção capilar aumentou com a adição de metacaulim. Já no caso das amostras moldadas com cimento CPV, areia, brita 0 e brita 1, a adição de metacaulim reduziu a absorção capilar.

A maior profundidade de carbonatação encontrada foi a do traço 2 utilizando o CPIII, cimento que possui menor resistência inicial em relação ao outro cimento utilizado, o CPV, de alta resistência inicial. Com a adição de metacaulim, em substituição à parte da massa de cimento, encontrou-se uma maior profundidade de carbonatação. Observou-se também que a combinação de dois tipos de agregados no concreto proporcionou menor profundidade de carbonatação, mesmo para uma resistência à compressão esperada elevada de 40MPa, pois a combinação de brita 0 e brita 1 proporciona menor diâmetro dos poros, dificultando assim a ocorrência da carbonatação.

Verificou-se que a adição de metacaulim proporcionou benefícios como o aumento da resistência à compressão para cimentos de alta resistência inicial, CPV. Apesar deste fenômeno ser esperado para todos os tipos de cimento, tal resultado não foi obtido para o cimento CPIII.

A adição de metacaulim proporcionou um aumento nos valores de absorção capilar e de profundidade de carbonatação, o que pode provocar danos à estrutura de concreto armado, devido à corrosão das armaduras.

Com base nos traços utilizados pode-se concluir que a adição de metacaulim é benéfica desde que o cimento possua uma alta resistência inicial e que o traço 11 com metacaulim, areia, brita 0 e brita 1 seria o mais recomendado para utilização.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudo das propriedades de absorção capilar e profundidade de carbonatação em amostras utilizando-se os mesmos traços e novas adições como escória.

Pesquisa do efeito do teor de metacaulim nos valores de absorção capilar e profundidade de carbonatação.

Alteração no teor de CO₂ da câmara de carbonatação, pesquisa de teores inferiores e superiores a 5%.

8 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655;2006 – Concreto de Cimento Portland – preparo, controle e recebimento - Procedimento.** Rio de Janeiro 2006.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900;2009 – Água para amassamento do concreto, Parte 1 – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768/1992 – Aditivos para Concreto de Cimento Portland – Especificação.** Rio de Janeiro 1992.

AGUILAR, Alberto Sepulcre; OLIVARES, Francisco Hernández. Assessment of phase formation in lime-based mortars with added metakaolin, Portland cement and sepiolite, for grouting of historic masonry **Cement and Concrete Research**, Volume 40, Ed. 1, p. 66 - 76, Janeiro 2010,

AQUINO, W Aquino; LANGE, D.A;OLEK, J.. The influence of metakaolin and silica fume on the chemistry of alkali–silica reaction products. **Original Research Article Cement and Concrete Composites**, Volume 23, Ed.6, p. 485 – 493, Dezembro 2001.

BADOGIANNIS, E.; KAKALI, G.; DIMOPOULOU, G.; CANIOTAKIS, E.; TSIVILIS S. Metakaolin as a main cement constituent. Exploitation of poor Greek kaolins. **Cement and Concrete Composites**, Volume 27, Ed.2, p. 197 – 203, Fevereiro 2005.

BADOGIANNIS, E.; TSIVILIS,S. Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete. **Cement and Concrete Composites**, Volume 31, Ed.2, p. 128 – 133, Fevereiro 2009.

BAI, J; WILD, S; Investigation of the temperature change and heat evolution of mortar incorporating PFA and metakaolin. **Cement and Concrete Composites**, Volume 24, Ed. 2, p. 201 – 209, Abril 2002.

BATIS, G.; PANTAZOPOULOU, P.; TAIVILIS, S., BADOGIANNIS,E. The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars. **Cement and Concrete Composites**, Volume 27, Ed.1, p. 125-130, Janeiro 2005.

BARIN, Daniel Sacchet. **Carbonatação e Absorção Capilar em Concretos de Cimento Portland Branco com Altos teores de Adição de Escória de Alto Forno e Ativador Químico**. 2008. 171p Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria – Programa de Pós -Graduação em Engenharia Civil – Santa Maria RS

BELTRÃO, F.C. Moda; ZENAIDE, J. CARLOS. A Influência do Metacaullim nas Propriedades do Concreto; 2010. 66f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Engenharia Civil); Universidade da Amazônia, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Engenharia Civil, Belém.

BROOKS, J.J; JOHARI, M.A Megat. Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete Original Research Article **Cement and Concrete Composites**, Volume 23, Ed.6, p. 495-502, Dezembro 2001.

CAFANGE, Daniele Maria Pilla Junqueira. **Estudo de Métodos auxiliares para o controle da resistência à carbonatação de concretos estruturais de Cimento Portland**. 2011, 377f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Programa de Pós Graduação em Engenharia de construção Civil e Urbana, São Paulo.

CAMARINI, G. Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água. in CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – IBRACON, 41, Salvador, 1999.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F. **Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto**, 2008, p. 309 -318. 2008.

CASCUDO, O. Inspeção e Diagnóstico de Estrutura em Concreto com Problemas de Corrosão de Armadura. In: Concreto Ensaio, Pesquisa e Realizações, Ed G.C. São Paulo: IBRACON, 2005

CASSAGNABÈRE, F.; DIEDERICH, P.; MOURET, M; ESCADEILLAS, G.; LACHEMI, M. Impact of metakaolin characteristics on the rheological properties of mortar in the fresh state **Cement and Concrete Composites**, Volume 37, p. 95 – 107, Março 2013.

CHANG, C.F; CHEN,J. W The experimental investigation of concrete carbonation depth
Cemente and Concrete Research, Volume 36, p. 1760-1767, 2006.

COSTA, M. P.; SILVA, M. C. PINHEIRO, S. M. M.; SOUZA, F. L. S. ZANDANADE F.;
COELHO, M. A. M.; MORINOTO, T. **Concretos com altos teores de escória de alto forno:
avaliação da carbonatação e difusão de íons clorettos** in CONGRESSO BRASILEIRO DO
CONCRETO – IBRACON, 47, Recife, 2005.

CUNHA, A.C.Q; HELENE, P.R.L **Despassivação das armaduras de concreto por ação da
carbonatação**. São Paulo: EPUSP. 2001. Boletim Técnico, Escola Politécnica da USP -
Departamento de Engenharia de Construção Civil BT/PCC/283.

DALLA LANA, E. F. **Carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto
com cinza volante e cal**, 2005. 120p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa
Maria, Santa Maria, 2005.

FIGUEIREDO, CR. **Estudo da carbonatação em estruturas de concreto armado em
Brasília: avaliação de pilares**, 2004. 222p. Tese (doutorado). Universidade de Brasília,
Brasília, 2004.

FORTES-REVILLA, Carlos; MARTINEZ-RAMIREZ, Sagrario; BLANCO-VARELA, María
Teresa. Modelling of slaked lime–metakaolin mortar engineering characteristics in terms of
process variables. Original Research Article **Cement and Concrete Composites**, Volume 28,
Ed. 5, p. 458-467, Maio 2006.

FRIAS, M., SÁNCHEZ M.I.Nde Rojas, CABRERA J.. The effect that the pozzolanic reaction
of metakaolin has on the heat evolution in metakaolin-cement mortars. **Cement and
Concrete Research**, Volume 30, Ed. 2, p. 209-216, Fevereiro 2000.

GAMEIRO, A.; SILVA, A. Santos; FARIA, P.; GRILO, J.; BRANCO, T.; VEIGA, R;
VELOSA, A..Physical and chemical assessment of lime–metakaolin mortars: Influence of
binder:aggregate ratio. **Cement and Concrete Composites**, Volume 45, p. 264 – 271, Janeiro
2012.

GISSELER, J., KOLLO, H., LANG, E. Influence of blast furnace cements on durability of
concrete structures, **ACI . Materials Journal**, Volume 92 n 3, Junho 1995.

HASSAN, Assem A.A.; LACHEMI, Mohamed; HOSSAIN, Khandaker M.A. Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete. **Cement and Concrete Composites**, Volume 34, Ed. 6, p. 801 – 807, Julho 2012.

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**, 1993, 231p. Tese (Livre Docente), escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil

HOSSAIN, Khandaker M. Anwar. Volcanic ash and pumice as cement additives: pozzolanic, alkali-silica reaction and autoclave expansion characteristics **Cement and Concrete Research**, Volume 35, Ed. 6, p. 1141 – 1144, Junho 2005.

HOU, Wei-Ming, CHANG Ping-Kun, HWANG Chao-Lung. A study on anticorrosion effect in high-performance concrete by the pozzolanic reaction of slag. **Cement and Concrete Research**, Volume 34, Ed. 4, p. 615 – 622, Abril 2004.

KAZMERCZAR, C. S. **Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com objetivo de proteção contra a carbonatação**, 1995, 168p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

KOPA, A.; KOWALD, R.; TRETTIN, R. Hydration behaviour, structure and morphology of hydration phases in advanced cement-based systems containing micro and nanoscale pozzolanic additives. **Cement and Concrete Research**, Volume 38, Ed. 7, p. 955 – 962, Julho 2008.

KOU, Shi-cong; POON, Chi-sun; AGRELA, Francisco. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures **Cement and Concrete Composites**, Volume 33, Ed.8, p. 788 – 795, Setembro 2011.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao Estudo da carbonatação em concretos e Argamassas Compostos com adição de Escória de Alto forno**, 2002, 178 p. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

MADANI, Hesam; BAGHERI, Alireza; PARHIZKAR, Tayebeh.. The pozzolanic reactivity of monodispersed nanosilica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of

Portland cement. **Cement and Concrete Research**, Volume 42, Ed.12, p. 1563 – 1570, Dezembro 2012.

METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 1994.573p.

MOULIN, E ; BLANC, P.,; SORRENTINO, D. Influence of key cement chemical parameters on the properties of metakaolin blended cements. **Cement and Concrete Composites**, Volume 23, Ed. 6, p. 463 – 469, Dezembro 2001.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. 2ª Ed. São Paulo: Editora Pini, 1997

PARROT, P. J. A review of carbonation in reinforced concrete, wexham springs, **Cement and Concrete Association**, 1996, 69p.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**, 2004, 176p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**, 2009, 233 p. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PERLOT, Céline; ROUGEAU, Patrick; DEHAUDT, Sylvain. Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete. Application for precast industry **Cement and Concrete Composites**, Volume 44, p. 50 – 57, Novembro 2013.

POON, Chi-Sun; AZHAR, Salman; ANSON, Mike; WONG, Yuk-Lung.. Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures Original Research Article **Cement and Concrete Composites**, Volume 25, Ed. 1, p. 83 – 89, Janeiro 2003.

PU Xincheng . Investigation on pozzolanic effect of mineral additives in cement and concrete by specific strength index. **Cement and Concrete Research**, Volume 29, Ed 6, p. 951 – 955, Dezembro 2001.

REGATTIERI, C. E. X. **Contribuição ao estudo da influência da dosagem do concreto na absorção capilar e penetração de íons cloreto**, 1998. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

SABIR, B.B; WILD, S Wild; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review Original Research Article **Cement and Concrete Composites**, Volume 23, Ed. 6, p. 441 – 454, Dezembro 2001.

SALMÃO, M. C. F., SILVA, T. J. **Ensaio Acelerado de carbonatação do concreto** in VII ENCONTRO INTERNO- XII SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

SHA, W ; PEREIRA, G.B. Differential scanning calorimetry study of ordinary Portland cement paste containing metakaolin and theoretical approach of metakaolin activity. **Cement and Concrete Composites**, Volume 23, Ed.6, p. 455 – 461, Dezembro 2001.

SHAYAN, Ahmad, XU Aimin. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. **Cement and Concrete Research**, Volume 36, Ed. 3, p. 457 – 468, Março 2006.

SILVA, A.C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose**, 2002, 128 p. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2002.

SILVA, Márcio Dario, *et al.* **Notas de Aula Concreto Armado: Materiais**. 2007, 12 pág. FUMEC- Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Belo Horizonte, 2007.

SORIANO, L; MONZÓ J.; BONILLA, M.;TASHIMA, M.M.;PAVÁ, J.;BORRACHERO, M.V.. Effect of pozzolans on the hydration process of Portland cement cured at low temperatures **Cement and Concrete Composites**, Volume 42, p. 41 – 48, Setembro 2013.

SPERB, J. E. K. **Carbonatação e Absorção Capilar em concretos com adições minerais e ativadores químicos**, Santa Maria, 2003, 108p.Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

STUMPP, M. J. **Carbonatação de concretos com altos teores de adição mineral e cal hidratada**, Santa Maria, 2003, 162p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, 2003.







SUELLINGS R.; MERTENS, G.; CIZER, Ö.; ELSEEN, J., Early age hydration and pozzolanic reaction in natural zeolite blended cements: Reaction kinetics and products by in situ synchrotron X-ray powder diffraction. **Cement and Concrete Research**, Volume 40, Ed. 12, p. 1704 – 1713, Dezembro 2010.

UEMOTO,T.; TAKADA, Y. Factors affecting concrete carbonations rate durability of building **Materials and Componentes**, Volume 6, 1993.

VANCE, Kirk; AGUAYO, Matthew; OEY, Tandre; SANT, Gaurav; NEITHALATH, Narayanan. Hydration and strength development in ternary portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin. **Cement and Concrete Composites**, Volume 39, p. 93 – 103, Maio 2013.

WILD, S.; KHATIB, M.; JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. **Cement and Concrete Research**, Volume 26, Ed.10, p. 1537 – 1544, Outubro 1996.

9 APENDICE

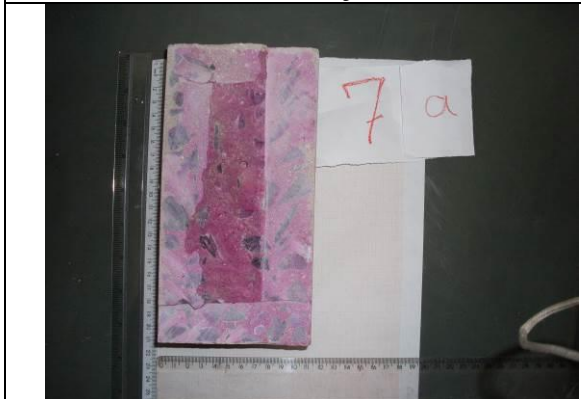
	
Ensaio de Carbonatação Amostra 1 a	Ensaio de Carbonatação Amostra 1 b
	
Ensaio de Carbonatação Amostra 2a	Ensaio de Carbonatação Amostra 2b
	
Ensaio de Carbonatação Amostra 4 a	Ensaio de Carbonatação Amostra 4 b



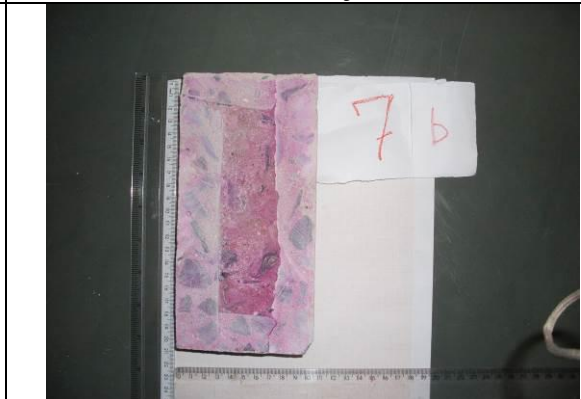
Ensaio de Carbonatação Amostra 5 a



Ensaio de Carbonatação Amostra 5 b



Ensaio de Carbonatação Amostra 7 a



Ensaio de Carbonatação Amostra 7 b



Ensaio de Carbonatação Amostra 8 a



Ensaio de Carbonatação Amostra 8 b



Ensaio de Carbonatação Amostra 10 a



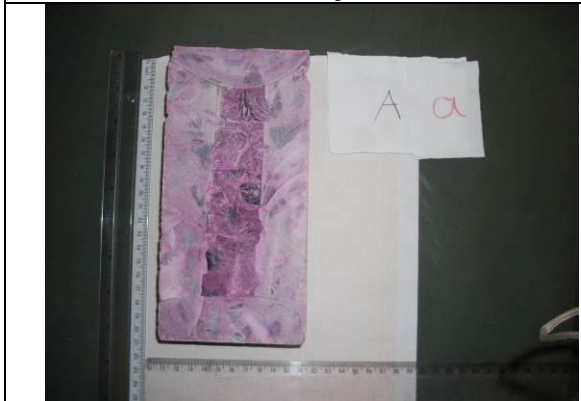
Ensaio de Carbonatação Amostra 10 b



Ensaio de Carbonatação Amostra 11 a



Ensaio de Carbonatação Amostra 11 b



Ensaio de Carbonatação Amostra A a



Ensaio de Carbonatação Amostra A b



Ensaio de Carbonatação Amostra B a



Ensaio de Carbonatação Amostra B b

