

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**INFLUÊNCIA DO METACAULIM NA
DURABILIDADE DE CONCRETOS USUAIS DE
MERCADO SUJEITOS À CARBONATAÇÃO
ACELERADA**

JOSÉ ROBERTO PERIM

D0084C13
GOIÂNIA
2013

JOSÉ ROBERTO PERIM

**INFLUÊNCIA DO METACAULIM NA
DURABILIDADE DE CONCRETOS USUAIS
DE MERCADO SUJEITOS À
CARBONATAÇÃO ACELERADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo

D0084C13
GOIÂNIA
2013

Ficha catalográfica elaborada
automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Perim, José Roberto
Influência do Metacaulim na Durabilidade de Concretos Usuais de
Mercado Sujeitos à Carbonatação Acelerada [manuscrito] / José Roberto
Perim. - 2013.
176 f.

Orientador: Prof. Oswaldo Cascudo.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de
Engenharia Civil (EEC) , Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2013.
Bibliografia. Apêndice.
Inclui símbolos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Concreto. 2. Durabilidade. 3. Carbonatação. 4. Metacaulim. I.
Cascudo, Oswaldo, orient. II. Título.

5104800
GOIÂNIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/96, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Dissertação

Autor (a):	José Roberto Perim		
CPF:	394.934.071-87		
E-mail:	jrperim.eng@gmail.com		
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim	<input type="checkbox"/> Não	
Vínculo empregatício do autor:	Nenhum		
Agência de fomento:	Campanha Nacional de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior	Sigla:	CAPES
País:	Brasil	UF:	GO
		CNPJ:	
Título:	Influência do Metacaulim na Durabilidade de Concretos Usuais de Mercado Sujeitos à Carbonatação Acelerada		
Palavras-chave:	Concreto, Durabilidade, Carbonatação, Metacaulim.		
Título em outra língua:	Metakaolin influence on Market Usual Concrete Durability subject to Accelerated Carbonation		
Palavras-chave em outra língua:	Concrete, Durability, Carbonation, Metakaolin.		
Área de concentração:	Construção Civil		
Data defesa: (dd/mm/aaaa)	30/09/2013		
Programa de Pós-Graduação:	Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção civil		
Orientador (a):	Dr. Oswaldo Cascudo		
E-mail:	ocascudo@gmail.com		
Co-orientador (a):			
E-mail:			

3. Informações de acesso ao documento:

Liberação para disponibilização? total parcial

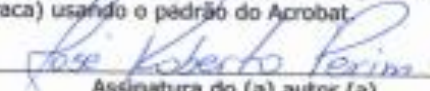
Em caso de disponibilização parcial, assinale as permissões:

Capítulos. Especifique: _____

Outras restrições: _____

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O Sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.


 Assinatura do (a) autor (a)

Data: 17 / 12 / 2014

¹ Em caso de restrição, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Todo resumo e metadados ficarão sempre disponibilizados.



Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO


Influência do Metacaulim na Durabilidade de Concretos Usuais de Mercado Sujeitos à Carbonatação Acelerada

José Roberto Perim

Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelos senhores:


Prof. Dr. Oswaldo Cascade (GECON/UFG)


Prof.ª Dr.ª Helena Carasek (GECON/UFG)


Prof. Dr. Cláudio de Souza Kazmierczak (UNISINOS)

Goiânia, 30 de setembro de 2013

A meu pai (in memoriam), por ter me ensinado e deixado exemplos de humildade, honestidade, trabalho e firmeza de caráter.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, que sempre me ilumina, dando forças, coragem, alento e disposição para enfrentar os constantes desafios da vida.

À minha esposa Maria Célia, minhas filhas Camilla e Brunna, pela compreensão e pela ajuda na superação das dificuldades encontradas durante os meus estudos.

Aos meus familiares e amigos que sempre me apoiam e incentivam, principalmente minha mãe e meus irmãos, pela dedicação e animosidade.

À Zenilda, uma grande amiga e um ser humano invejável que sempre me incentivou, sem a qual provavelmente não teria iniciado o mestrado.

Aos meus colegas de mestrado, Aline, Antonio Claret, Camilla, Daniel, Elianne, Marco Antônio, Ninfa, José Henrique, Mário, Murillo, Pedro Henrique, Mariana, Márcia, Marina, Valcemor e outros com quem tive menos contato, meu muito obrigado pela amizade.

Aos professores do mestrado da área de Construção Civil, Helena Carasek, Maria Carolina, Oswaldo Cascudo, Tatiana Amaral, que com dedicação, paciência e competência, puderam repassar muito de suas experiências e conhecimentos.

Ao meu orientador Oswaldo Cascudo e também à Professora Dra. Helena Carasek, pela disponibilidade, pelo apoio, sugestões e contribuições durante o desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao Engenheiro Fernando Bueno pelas dicas e ajuda na elaboração de estudos piloto e execução de gráficos, que muito contribuíram para o andamento da pesquisa.

À CONCRECON, que concedeu os materiais, apoio técnico e logístico para a moldagem dos corposdeprova, bem como ao Engenheiro Marcelo Cândido, pela disponibilidade, orientação, interesse na pesquisa e pelo acompanhamento na moldagem dos corposdeprova.

À Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda., que concedeu a adição mineral metacaulim utilizada nos traços, para a moldagem dos corposdeprova.

Ao Laboratório CARLOS CAMPOS que abriu suas portas e disponibilizou toda sua infraestrutura para a execução da moldagem, processo de cura e ensaios de resistência à compressão e absorção por imersão. E, ao Engenheiro Denilson pela disponibilidade, pelas orientações e apoio durante a pesquisa.

À ELETROBRÁS FURNAS, pelo apoio na execução dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados, difração de raios X, carbonatação acelerada e medidas de profundidade carbonatada. E a todos os seus funcionários, em especial ao Engenheiro Alexandre de Castro, pelo acompanhamento, apoio, discussões e orientações tão valiosas, e também ao Aloísio, ao Gilberto, ao Renato, à Heloísa, ao Tizzo e outros, pelo apoio e orientação na condução da pesquisa.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoa de Ensino Superior (CAPES), pelo indispensável apoio financeiro, em forma de bolsa, durante a pesquisa.

À Universidade Federal de Goiás, por ter me concedido a oportunidade de estudar numa instituição pública, gratuita e de notável qualidade.

José Roberto Perim

*É graça divina começar bem. Graça maior
persistir na caminhada certa. Mas graça das
graças é não desistir nunca.*

Dom Hélder Câmara

RESUMO

O concreto, por ser um dos materiais mais consumidos no mundo, vem sendo objeto de vários estudos e pesquisas no intuito de melhorar e aprimorar as suas características no que se refere aos aspectos técnicos, econômicos e ambientais visando a uma maior durabilidade. Soluções têm sido buscadas e ações implementadas na produção desses concretos para se atingir esses objetivos, e uma delas é a incorporação de adições minerais em substituição parcial ao cimento Portland utilizado na produção desse material. Diversas adições têm sido estudadas ao longo do tempo, dentre elas a cinza volante, a escória de altoforno, a sílica ativa, a cinza da casca de arroz, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar e o metacaulim. Essa última é uma pozolana de alta reatividade e vem sendo estudada por ser um material alternativo de grande potencial e abundante, encontrada em várias partes do mundo, além de trazer uma série de vantagens, como a facilidade de exploração, a utilização de um processo relativamente simples na sua industrialização, baixo custo de produção e comercialização, e menor impacto ambiental quando comparado ao clínquer. Várias pesquisas já comprovaram o seu potencial como material pozolânico, porém, poucos estudos foram realizados no sentido de verificar a durabilidade das estruturas de concreto correntes do mercado com a adição do metacaulim. A carbonatação, que é, simplificada, uma reação química entre o dióxido de carbono do ar e o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento e que ocorre nas camadas superficiais em contato com o ambiente a que o concreto está exposto, é um dos fenômenos mais importantes para o início do processo de corrosão das armaduras, fenômeno este que pode levar estruturas ao colapso. Nesta pesquisa, foram estudados dois grupos de concretos, sendo abordados, no primeiro, níveis de 10%, 12,5%, 15%, 17,5% e 20% de metacaulim em substituição em massa ao cimento e com mesma relação a/ag (0,60), e no segundo grupo foram utilizados os níveis de substituição de 10%, 15% e 20%, mantendo-se a mesma faixa de resistência, com variação da relação a/ag. O comportamento desses concretos foi analisado em relação à resistência à compressão nas idades de 3, 7, 28, 56 e 91 dias, à absorção de água por imersão aos 91 dias e às mudanças microestruturais e mineralógicas. Também se avaliou o avanço da frente de carbonatação, com medidas de profundidade carbonatada e ganhos de massa, no decorrer de 16 semanas, após condicionamento, onde esses concretos foram submetidos ao processo de carbonatação acelerada em incubadora de CO₂, cujos parâmetros adotados foram os seguintes: temperatura de 20°C, umidade relativa de 75% e concentração de CO₂ de 6%. Os resultados mostraram que, na medida em que se aumenta o nível de metacaulim, há ganhos de resistência à compressão atingindo níveis entre 8% e 16% acima do concreto de referência. Em relação ao processo de carbonatação, os comportamentos dos concretos do primeiro grupo foram bastante semelhantes ao concreto de referência, sendo que os níveis de 10% e 15% de substituição obtiveram os melhores desempenhos. Os concretos do segundo grupo ficaram com desempenho bem abaixo dos demais, mostrando a grande influência da relação a/ag em relação à carbonatação.

Palavras-chave: Concreto. Durabilidade. Carbonatação. Metacaulim.

ABSTRACT

The concrete, to be one of the most consumed material in the world, has been the object of several studies and researches in order to improve and enhance its features with respect to technical, economical and environmental aspects, aiming a higher durability. Solutions have been searched and actions have been implemented in order to produce such concrete and to achieve these goals. One of which is the incorporation of mineral additions to replace part of the Portland cement used in the production of this material. Several additions have been studied over time, among them are the fly ash, the slag blast furnace, the silica fume, the ash from rice husk, the bagasse ash from sugar cane and the metakaolin. The latter is a high reactivity pozzolan and it is being studied to be an alternative material of great potential and abundance, it is found in several parts of the world and it has a great number of advantages, such as ease of exploration, the use of a relatively simple process in its industrialization, the low cost of production and trade, besides a lower environmental impact when compared to the clinker. Several researches have already proved its potential as pozzolanic material, however, a few studies have been conducted in order to verify the durability of concretecurrent market with the addition of metakaolin. The carbonation, which is, simplifying, a chemical reaction between the carbon dioxide from the air and the calcium hydroxide present in cement paste, and occurs in the surface layers in contact with the environment to which the concrete is exposed, is one of the most important phenomenon to the beginning of the process of corrosion that causes major problems related to the lack of durability of structures, can lead to the collapse of structures. In this research, two groups of concrete were studied. In the first group were addressed levels of 10%, 12,5%, 15%, 17,5% and 20% of metakaolin in replacement of the cement and with the same relation a/ag (0,60). And in the second group were used the substitution levels of 10%, 15% and 20%, keeping the same range of resistance with variation of the ratio a/ag. The behavior of these concrete was analyzed in relation of its resistance to compressive strength at ages 3, 7, 28, 56 and 91 days, to water absorption by immersion at 91 days, and to microstructural and mineralogical changes. It as also evaluated the advancing front of carbonationmeasurements of the depth of the carbonation and mass gain during 16 weeks after preconditioning, where these concrete were subjected to accelerated carbonation process in a CO₂ incubator, whose parameters used were as follows: temperature of 20°C, 75% relative humidity and CO₂ concentration from 6%. The results showed that as the level of metakaolin increases, there are strength gains by compression, reaching levels between 8% and 16% higher than the reference concrete. Regarding the carbonation process, the behavior of the concrete of the first group was very similar to the reference concrete, and that levels 10% and 15% of substitution had the best performances. The concrete of the second group performed well below the other group, showing the great influence of ratio a/g related to carbonation.

Keywords: Concrete. Durability. Carbonation. Metakaolin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Representação esquemática da estrutura da caulinita (a). Representação esquemática da lamela (b), visão superior (c) e inferior (d) da lamela. (WYPYCH; SATYANARAYANA, 2004).	34
Figura 2.2- Visualização de cristais de caulinita (a, b) (WYPYCH; SATYANARAYANA, 2004).	35
Figura 2.3- Visualização da caulinita a) e, b) da metacaulinita (BARATA; DAL MOLIN, 2002).	35
Figura 2.4- Influência do metacaulim na formação da zona de transição: a) e b) mistura composta apenas por cimento; c) e d) mistura composta por cimento e metacaulim, sequencialmente antes e após as reações pozolânicas. “C” representa a partícula de cimento e “MK” as de metacaulim (BENTUR; ODLER ^{2.1} , 1996 <i>apud</i> CASTRO, 2003).	47
Figura 2.5- Representação esquemática da hipótese sobre a majoração da hidratação do cimento nas primeiras idades (LAWRENCE; CYR; RINGOT ^{2.2} , 2003 <i>apud</i> HOPPE FILHO, 2008).	48
Figura 2.6- Liberação de calor em pasta de cimento (ROCHA, 2005).	51
Figura 2.7- Estimativa da média global de resistência à compressão em função do tipo de adição (CASTRO, 2003).	54
Figura 2.8- Resistência à compressão x teor de substituição aos 28 dias de idade (SOUZA, 2003).	55
Figura 2.9- Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, em função da relação 1: m (CARMO, 2006).	56
Figura 2.10- Resistência à tração na flexão e por compressão diametral em função do teor de substituição aos 28 dias de idade (SOUZA, 2003).	56
Figura 2.11- Módulo de elasticidade em função do teor de substituição aos 28 dias de idade (SOUZA, 2003).	58
Figura 2.12- Profundidade carbonatada dos concretos (DUAN <i>et al.</i> , 2012).	65

Figura 3.1- Carbonatação do Ca(OH) ₂ (THIÉRY, 2005).....	69
Figura 3.2- Representação esquemática da difusão de CO ₂ nas situações de poros secos (a), poros parcialmente preenchidos (b) e poros saturados (c) (BAKKER, 1988).	71
Figura 3.3- Representação esquemática do processo de carbonatação (CEB, 1984).	71
Figura 3.4- Consequências mais relevantes da carbonatação no concreto.	72
Figura 3.5- Redução do pH com o avanço da carbonatação (adaptada de:GLASSER; MATSCHEI, 2007).....	73
Figura 3.6- Fatores que influenciam a carbonatação.	75
Figura 3.7- Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente (CASCUDO, 1977).	77
Figura 3.8- Influência da concentração de CO ₂ nos coeficientes de carbonatação (baseada em ROUGEAU, 1997).....	79
Figura 3.9- Aumento na massa de amostras submetidas à carbonatação acelerada (baseada em CASTELLOTE <i>et al.</i> , 2009).....	79
Figura3 10- Profundidades carbonatadas de argamassas em diferentes concentrações de CO ₂ (baseada em HYVERT, 2009).	80
Figura 3.11- Influência da relação a/c e da condição de cura na profundidade carbonatada do concreto (PINA, 2009).	82
Figura 3.12- Relação entre o teor de cimento e a profundidade carbonatada (CASCUDO; CARASEK, 2011).....	83
Figura 3.13- Influência do teor de adições e da cura úmida na permeabilidade do concreto (CEB, 1993).	85
Figura 3.14- Influência da cura e da relação água/cimento na carbonatação do concreto obtida por procedimento acelerado, em concretos com cimento CP II F-32 (CASCUDO; CARASEK, 2011).....	85
Figura 3.15- Profundidade de carbonatação em concretos com difusão de CO ₂ em uma (1D), duas (2D) e três direções (3D) (adaptada de CHEN <i>et al.</i> ,2008 <i>apud</i> PAULETTI, 2009).....	87

Figura 3.16- Média global dos coeficientes de carbonatação acelerada, de diferentes concretos (de mesma faixa de relação a/agl), agrupados por tipo de adição mineral empregada, obs.: cura ao ar (CASTRO, 2003).....	93
Figura 4.1- Esquema ilustrativo das etapas do condicionamento.....	104
Figura 4.2- Disposição geral do experimento.....	106
Figura 4.3- Estudo para definição da relação a/ag dos concretos do segundo grupo.	107
Figura 4.4- Difratoograma de raios X da amostra de cimento.	110
Figura 4.5- Difratoograma de raios X da amostra de metacaulim.....	112
Figura 4.6- Difratoograma de raios X da amostra de metacaulim-análises acumuladas.....	113
Figura 4.7- Micrografias do metacaulim utilizado na pesquisa, onde tem-se em a) magnitude de 1500 vezes, em b) magnitude de 2200 vezes e em c) magnitude de 10 000 vezes.....	114
Figura 4.8- Gráfico da distribuição granulométrica da areia natural.....	117
Figura 4.9- Gráfico da distribuição granulométrica da areia artificial.	117
Figura 4.10- Fluxograma dos diferentes tipos e da distribuição dos corpos de prova.	120
Figura 4.11- Detalhes da moldagem e ensaios de caracterização do concreto no estado fresco, onde se observa em: a) agregados pesados em bandejas metálicas, b) dispersão do metacaulim, c) concreto misturado pronto para moldagem, d) execução do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, e) ensaio de massa específica, d) concreto moldado em fôrma cilíndrica, e) ensaio de teor de ar, f) argamassa moldada em fôrma prismática 40x40x160mm, g) concreto moldado em fôrma prismática 100x100x50mm.	123
Figura 4.12- Material utilizado no processo de dessorção do condicionamento, onde se vê em a) material obtido após passagem pelo britador, e em b) material após a trituração no quebra gelo.	125
Figura 4.13- Etapas do condicionamento de corpos de prova, onde se observa: em a) aplicação de verniz poliuretano, em b) envelopamento com filme de PVC, em c) corpo de prova embrulhado com saco plástico de	

polipropileno metalizado e em d) corpos de prova em estufa ventilada para redistribuição de umidade.....	127
Figura 4.14- Disposição dos corpos de prova dentro da incubadora de CO ₂	131
Figura 4.15- Detalhes: a) Incubadora de CO ₂ e b) Painel de controle.....	131
Figura 4.16- a) Corte das amostras com cortadeira elétrica e b) momento da aspersão da fenolftaleína.	132
Figura 4.17- Corpos de prova aspergidos com 09 semanas de carbonatação acelerada. ..	133
Figura 4.18- Corpos de prova aspergidos com 16 semanas de carbonatação acelerada. ..	133
Figura 4.19- Medida da profundidade carbonatada por meio de paquímetro digital.	134
Figura 4.20- Etapas do cálculo da profundidade carbonatada por meio de programa computacional.....	135
Figura 4.21- Fotografias do difratômetro de raios X onde se têm em a) uma vista geral externa do equipamento e em b) uma vista interna com detalhe do porta-amostras.	138
Figura 4.22- Termobalança utilizada nas análises termogravimétricas.....	139
Figura 4.23- Etapas para obtenção de imagens no microscópio eletrônico de varredura, onde se tem: em a), amostras no porta-amostras com aplicação de tinta grafite para contato com a metalização em ouro; em b), amostras metalizadas com ouro prontas para as análises no MEV; em c), detalhe do equipamento para metalização a vácuo; e em d), o microscópio eletrônico de varredura.	140
Figura 5.1- Gráfico da resistência média à compressão x idade para os concretos do grupo I.....	142
Figura 5.2- Gráfico da resistência média à compressão x idade para os concretos do grupo II.	143
Figura 5.3- Ganhos de resistência em relação ao concreto de referência aos 91 dias.	144
Figura 5.4- Evolução da profundidade carbonatada pelo tempo de exposição.	149
Figura 5.5- Gráfico da profundidade carbonatada pelo tempo de exposição ao CO ₂	150
Figura 5.6- Coeficientes de carbonatação acelerada dos concretos do grupo I.....	151

Figura 5.7- Coeficientes de carbonatação acelerada dos concretos do grupo II.....	151
Figura 5.8- Correlação entre ganho de massa e profundidade carbonatada dos concretos do grupo I.	152
Figura 5.9- Correlação entre ganho de massa e profundidade carbonatada dos concretos do grupo II.	152
Figura 5.10- Difratoformas das amostras não carbonatadas do grupo I.	158
Figura 5.11- Difratoformas das amostras não carbonatadas do grupo II.	158
Figura 5.12- Difratoformas das amostras carbonatadas do grupo I.	159
Figura 5.13- Difratoformas das amostras carbonatadas do grupo II.	159
Figura 5.14- Análise termogravimétrica das amostras não carbonatadas do grupo I.....	161
Figura 5.15- Análise termogravimétrica das amostras carbonatadas do grupo I.....	162
Figura 5.16- Análise termogravimétrica das amostras não carbonatadas do grupo II.	163
Figura 5.17- Análise termogravimétrica das amostras carbonatadas do grupo II.	163
Figura 5.18- Porosimetria por intrusão de mercúrio das amostras não carbonatadas (volume acumulado).	166
Figura 5.19- Porosimetria por intrusão de mercúrio das amostras não carbonatadas (distribuição do volume).....	166
Figura 5.20- Porosimetria por intrusão de mercúrio das amostras carbonatadas (volume acumulado).	167
Figura 5.21- Porosimetria por intrusão de mercúrio das amostras carbonatadas (distribuição do volume).....	167
Figura 5.22- Micrografias de argamassas de concretos não carbonatadas, onde se tem em a) concreto 15A com ampliação de 30 vezes, em b) concreto 20F com ampliação de 500 vezes, em c) concreto 15A com ampliação de 250 vezes e em d) concreto 20F com ampliação de 4000 vezes.	169
Figura 5.23- Micrografias de argamassas de concretos carbonatadas onde se tem: a) e b) amostras dos concretos R e 15A com ampliação de 30 vezes; c) amostra do concreto 10F com ampliação de 2300 vezes; d) amostra do concreto R com ampliação de 7000 vezes; e) amostra do concreto 15A com ampliação	

de 10 000 vezes; e f) amostra do concreto 15F com ampliação de 15 000 vezes.	169
Figura A.1- Gráfico idade x resistência do concreto de referência para estudo do concreto 10F.	188
Figura A.2- Gráfico idade x resistência para as relações a/ag estudadas do concreto 10F.	188
Figura A.3- Gráfico resistência projetada aos 91 dias x relação a/ag do concreto 10F....	189
Figura A.4- Gráfico idade x resistência do concreto de referência para estudo do concreto 15F.	191
Figura A.5- Gráfico idade x resistência para as relações a/ag estudadas do concreto 15F.	191
Figura A.6- Gráfico resistência projetada aos 91 dias x relação a/ag do concreto 15F....	192
Figura A.7- Gráfico idade x resistência do concreto de referência para estudo do concreto 20F.	194
Figura A.8- Gráfico idade x resistência para as relações a/ag estudadas do concreto 20F.	194
Figura A.9- Gráfico resistência projetada aos 91 dias x relação a/ag do concreto 20F....	195
Figura C.1- Determinação dos coeficientes de carbonatação a partir das curvas de tendência.	207
Figura C.2- Difrátograma da argamassa R não carbonatada.	208
Figura C.3- Difrátograma da argamassa R carbonatada.	208
Figura C.4- Difrátograma da argamassa 10A não carbonatada do primeiro grupo.	209
Figura C.5- Difrátograma da argamassa 10A carbonatada do primeiro grupo.	209
Figura C.6- Difrátograma da argamassa 15A não carbonatada do primeiro grupo.	210
Figura C.7- Difrátograma da argamassa 15A carbonatada do primeiro grupo.	210
Figura C.8- Difrátograma da argamassa 20A não carbonatada do primeiro grupo.	211
Figura C.9- Difrátograma da argamassa 20A carbonatada do primeiro grupo.	211
Figura C.10- Difrátograma da argamassa 10F não carbonatada do segundo grupo.	212

Figura C.11- Difratoograma da argamassa 10F carbonatada do segundo grupo.	212
Figura C.12- Difratoograma da argamassa 15F não carbonatada do segundo grupo.....	213
Figura C.13- Difratoograma da argamassa 15F carbonatada do segundo grupo.	213
Figura C.14- Difratoograma da argamassa 20F não carbonatada do segundo grupo.....	214
Figura C.15- Difratoograma da argamassa 20F carbonatada do segundo grupo.	214

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Requisitos químicos e físicos do metacaulim, conforme NBR 15 894-1 (2010).....	40
Tabela 2.2- Propriedades físicas do metacaulim (SIDDIQUE, 2008).....	41
Tabela 2.3- Composição química típica de metacaulim (AMBROISE; MAXIMILIEN; PERA, 1994).....	42
Tabela 2.4- Exigências químicas do metacaulim (adaptada de: Souza, 2003).....	42
Tabela 2.5- Exigências físicas para os materiais pozolânicos (NBR 12 653, 2012).	44
Tabela 2.6- Exigências químicas para os materiais pozolânicos (NBR 12 653, 2012).....	44
Tabela 2.7 – Pesquisas realizadas com metacaulim em relação a aspectos de durabilidade.	61
Tabela 2.8- Penetrabilidade de íons cloreto com base na carga passante (adaptada de ASTM C 1202 (1995)).	64
Tabela 2.9 - Permeabilidade de cloretos em concretos (adaptada de POON; KOU; LAM, 2006).	64
Tabela 3.1- Concentração do CO ₂ no ar em relação a alguns tipos de ambientes (NEVILLE, 1997).....	78
Tabela 3.2- Pesquisas realizadas com adições minerais em relação à carbonatação.	91
Tabela 4.1- Definição das variáveis independentes do programa experimental.	102
Tabela 4.2- Codificação adotada no programa experimental.	102
Tabela 4.3- Características físicas, mecânicas e químicas do cimento Portland.	109
Tabela 4.4- Principais características do metacaulim.....	111
Tabela 4.5- Base química e massa específica dos aditivos empregados.	115
Tabela 4.6- Caracterização dos agregados graúdos.....	115
Tabela 4.7- Caracterização dos agregados miúdos.....	116
Tabela 4.8- Consumo de materiais dos concretos em estudo.	119

Tabela 4.9- Parâmetros de dosagem dos concretos e caracterização no estado fresco.	128
Tabela 5.1- Dados das resistências médias e classes de resistência dos concretos.	142
Tabela 5.2- Dados relativos de ganhos de resistência dos concretos.	144
Tabela 5.3- Dados de absorção por imersão, índice de vazios e massa específica.	146
Tabela 5.4- Critérios de avaliação da absorção de água do concreto, segundo o CEB-192 (1989).....	146
Tabela 5.5- Profundidade carbonatada média, ganho de massa e coeficiente de carbonatação.	148
Tabela 5.6- Classes de agressividade ambiental (ABNT NBR 6118:2007).....	153
Tabela 5.7- Previsão de vida útil das estruturas para os concretos estudados.....	155
Tabela 5.8- Coeficientes de carbonatação natural e vida útil de projeto estimada obtidas da correlação verificada por Ferreira (2013), a partir de dados de carbonatação acelerada deste trabalho.....	156
Tabela 5.9- Resumo dos compostos identificados na análise mineralógica por DRX de todas as amostras.	160
Tabela A.1- Resultados individuais de resistência à compressão para o estudo da relação a/ag do concreto 10F do segundo grupo.	187
Tabela A.2- Cálculo das projeções de resistências do concreto 10F aos 28 e 91 dias.	188
Tabela A.3- Cálculo da relação a/ag do concreto 10F para resistência projetada aos 91 dias.....	189
Tabela A.4- Resultados individuais de resistência à compressão para o estudo da relação a/ag do concreto 15F do segundo grupo.	190
Tabela A.5- Cálculo das projeções de resistências do concreto 15F aos 28 e 91 dias.	191
Tabela A.6- Cálculo da relação a/ag do concreto 15F para resistência projetada aos 91 dias.....	192
Tabela A.7- Resultados individuais de resistência à compressão para o estudo da relação a/ag do concreto 20F do segundo grupo.	193
Tabela A.8- Cálculo das projeções de resistências do concreto 20F aos 28 e 91 dias.	194

Tabela A.9- Cálculo da relação a/a_g do concreto 15F para resistência projetada aos 91 dias.	195
Tabela B.1- Dados de resistência à compressão axial em concretos com 3dias de cura úmida submersa.	197
Tabela B.2- Dados de resistência à compressão axial em concretos com 7dias de cura úmida submersa.	198
Tabela B.3- Dados de resistência à compressão axial em concretos com 28dias de cura úmida submersa.	199
Tabela B.4- Dados de resistência à compressão axial em concretos com 56dias de cura úmida submersa.	200
Tabela B.5- Dados de resistência à compressão axial em concretos com 91dias de cura úmida submersa.	201
Tabela B.6- Dados de absorção, índice de vazios e massa específica em concretos com 91 dias de cura úmida submersa.	202
Tabela C.1- Medidas de profundidade carbonatada média dos concretos do primeiro grupo.	204
Tabela C.2- Medidas de profundidade carbonatada média dos concretos do segundo grupo.	205
Tabela C.3- Dados das médias de profundidades carbonatadas e ganhos de massa.	206

LISTA DE SÍMBOLOS

a/ag	–Água/aglomerante (cimento + adição mineral)
a/c	–Água/cimento
Al ₂ O ₃	– Óxido de alumínio ou alumina
Al ₂ O ₃ .2SiO ₂ ou AS ₂	– Fórmula molecular e simplificada do metacaulim
ACI	– <i>American Concrete Institute</i>
ASTM	– <i>American Society for Testing and Materials</i>
CaCO ₃	– Carbonato de cálcio
Ca(OH) ₂ ou CH	– Hidróxido de cálcio
CE	– Comissão de estudos
CEB	– <i>Comité Euro- International du Béton</i>
CO ₂	– Dióxido de carbono ou gás carbônico
C-A-H	– Aluminato de cálcio hidratado
C-A-S-H	– Silicoaluminato de cálcio hidratado
C-S-H	– Silicato de cálcio hidratado
C/S	– Relação cálcio/silício
fck	– Resistência à compressão característica do concreto aos 28 dias
INSA	– <i>Institut National des Sciences Appliquées</i>
MCAR	– Metacaulim de alta reatividade
µm	– micrômetro (10 ⁻⁶ metros)
NBR	– Norma Brasileira Regulamentadora
pH	– Potencial de hidrogênio
PPG/GECON	– Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil
SiO ₂	– Dióxido de silício ou sílica

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 -INTRODUÇÃO.....	26
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE O TEMA	26
1.2 JUSTIFICATIVA	28
1.3 OBJETIVOS	29
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	30
CAPÍTULO 2 - METACAULIM.....	31
2.1 CONCEITUAÇÃO / HISTÓRICO	31
2.2 ADIÇÃO MINERAL PARA CONCRETOS	32
2.3 PRODUÇÃO E OBTENÇÃO	35
2.4 CLASSIFICAÇÃO CONFORME NORMALIZAÇÃO BRASILEIRA.....	37
2.5 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS	40
2.5.1 Características físicas.....	40
2.5.2 Características químicas	41
2.5.3 Pozolanicidade do material.....	43
2.6 CONCRETO COM METACAULIM	45
2.6.1 Microestrutura do concreto.....	45
2.6.2 Influências nas propriedades do estado fresco.....	48
2.6.2.1 Consumo de água.....	48
2.6.2.2 Aspectos reológicos	49
2.6.2.3 Calor de hidratação	50
2.6.2.4 Fissuração por dessecação superficial e retração plástica	52
2.6.3 Influências nas propriedades no estado endurecido.....	53
2.6.3.1 Resistência à compressão	53
2.6.3.2 Resistência à tração.....	55

2.6.3.3	Módulo de elasticidade	57
2.7	DURABILIDADE DO CONCRETO COM METACAULIM	58
2.7.1	Considerações Gerais.....	59
2.7.2	Algumas pesquisas realizadas.....	61
CAPÍTULO 3 - CARBONATAÇÃO		67
3.1	O FENÔMENO DA CARBONATAÇÃO	67
3.2	CONSEQUÊNCIAS DA CARBONATAÇÃO	72
3.2.1	Redução do pH	72
3.2.2	Alteração na porosidade	74
3.2.3	Aumento de massa.....	74
3.2.4	Retração	74
3.2.5	Aumento na dureza superficial	75
3.3	FATORES QUE INTERFEREM NA CARBONATAÇÃO	75
3.3.1	Condições ambientais	76
3.3.1.1	Temperatura.....	76
3.3.1.2	Umidade relativa.....	76
3.3.1.3	Teor de CO ₂	77
3.3.2	Características do concreto	81
3.3.2.1	Relação água/aglomerante (a/ag).....	81
3.3.2.2	Consumo de cimento no concreto.....	83
3.3.2.3	Adições minerais	83
3.3.2.4	Condições de cura.....	85
3.3.3	Condições do ensaio	86
3.3.3.1	Forma das amostras	86
3.3.3.2	Cura.....	87
3.3.3.3	Precondicionamento	88

3.4	DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ADIÇÕES QUANTO À CARBONATAÇÃO.....	91
3.5	MÉTODOS UTILIZADOS NA PESQUISA PARA AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE CARBONATADA	96
3.5.1	Indicadores de pH	96
3.5.2	Microscopia eletrônica de varredura	97
3.5.3	Porosimetria por intrusão de mercúrio	98
3.5.4	Difração de raios X.....	98
3.5.5	Termogravimetria	99
3.6	ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	100
CAPÍTULO 4 - PROGRAMA EXPERIMENTAL - MATERIAIS E MÉTODOS.....		101
4.1	VARIÁVEIS.....	101
4.2	CONDIÇÕES FIXAS.....	103
4.3	APRESENTAÇÃO GERAL DO EXPERIMENTO	105
4.4	MATERIAIS UTILIZADOS.....	108
4.5	DOSAGEM E PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	118
4.5.1	Dosagem dos concretos	118
4.5.2	Produção dos corpos de prova	119
4.5.2.1	Mistura, moldagem e cura dos corpos de prova	121
4.5.2.2	Precondicionamento dos corpos de prova	124
4.6	MÉTODOS.....	127
4.6.1	Caracterização do concreto fresco	127
4.6.2	Avaliação dos concretos endurecidos não carbonatados	129
4.6.3	Avaliação dos concretos endurecidos carbonatados.....	129
4.6.3.1	Processo de carbonatação acelerada	130
4.6.3.2	Determinação da profundidade carbonatada	131
4.6.3.3	Determinação do ganho de massa.....	136

4.6.3.4	Determinação do coeficiente de carbonatação	136
4.6.4	Caracterização mineralógica e avaliação da microestrutura e porosidade das amostras de argamassa dos concretos	137
4.6.4.1	Difração de raios X (DRX).....	138
4.6.4.2	Análise termogravimétrica (ATG).....	139
4.6.4.3	Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM).....	139
4.6.4.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	140
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO		141
5.1	CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO ENDURECIDO	141
5.1.1	Resistência à compressão	141
5.1.1.1	Algumas considerações sobre a resistência à compressão	145
5.1.2	Absorção de água por imersão.....	146
5.2	CARBONATAÇÃO ACELERADA DO CONCRETO	147
5.2.1	Profundidade carbonatada e ganho de massa	148
5.2.2	Estimativa de vida útil de projeto	153
5.3	ANÁLISE DA MINERALOGIA, MICROESTRUTURA E POROSIDADE DAS ARGAMASSAS DOS CONCRETOS.....	157
5.3.1	Resultados da difratometria de raios X.....	157
5.3.2	Análise termogravimétrica.....	161
5.3.3	Porosimetria por intrusão de mercúrio	165
5.3.4	Microscopia eletrônica de varredura	168
5.4	ANÁLISE E DISCUSSÃO GLOBAL DOS RESULTADOS	171
CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS		172
6.1	CONCLUSÕES DA PESQUISA	172
6.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA EMPREGADA.....	172
6.3	CONSIDERAÇÃO FINAL.....	1765
6.4	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	1726

REFERÊNCIAS	177
-------------------	-----

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Este trabalho segue uma linha de pesquisa iniciada por Castro (2003), que analisou vários aspectos relacionados à durabilidade de concretos com diversas adições minerais, no contexto da carbonatação, tendo obtido resultados expressivos com o metacaulim na proporção de 10% em substituição ao cimento. A partir de então, outros trabalhos na Universidade Federal de Goiás investigaram aspectos da durabilidade de concretos com essa adição, dentre os quais, podem ser ressaltados os trabalhos de Galvão (2004), Oliveira A. (2007), Mendes (2009) e Ferreira (2013). No âmbito específico da presente pesquisa, a abordagem do emprego do metacaulim em concretos usuais de mercado, iniciou-se com trabalhos de Figueiredo (2011) e Santos, Monteiro e Silva Junior (2012), que avaliaram o desempenho de concretos correntes com metacaulim sob ação de cloretos, bem como se aprofundaram nos mecanismos de proteção contra esses íons propiciados pelo metacaulim. O trabalho de Figueiredo (2011) é uma dissertação de mestrado desenvolvida conjuntamente entre a Universidade de Aveiro (Portugal) e a UFG. A pesquisa global se completa com o presente trabalho, que investiga a influência do metacaulim na durabilidade de concretos usuais de mercado sujeitos à carbonatação, apresentada como dissertação de mestrado ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE O TEMA

O concreto tem sido, ao longo dos anos, alvo de vários estudos e pesquisas na busca por entender melhor seu comportamento, tanto nos aspectos físicos e mecânicos como também nos aspectos microestruturais.

Uma das mais graves manifestações patológicas que incide nas estruturas de concreto em serviço é a corrosão das armaduras, que pode levar essas estruturas ao colapso. A corrosão se torna evidente nos elementos estruturais pela falta de proteção física (cobrimento) ou pela falta de proteção química, o que compromete a estabilidade da película passivadora

(fina camada protetora de óxidos de ferro passivos, depositada sobre a superfície do aço em contato com concretos de alto pH). O pH da solução dos poros do concreto é muito elevado, devido aos íons alcalinos em solução, provenientes das reações de hidratação do cimento, girando esse pH em torno de 12,5 a 13,5. O início da corrosão ocorre justamente pela queda do pH da solução do poro do concreto, que pode ocorrer em função de alguns fenômenos como a carbonatação, a lixiviação, o ataque por soluções ácidas, e também pela ação de cloretos que atacam diretamente as armaduras (CASCUDO, 1997).

A carbonatação é um processo lento e progressivo, que depende principalmente dos níveis de dióxido de carbono (CO_2) e da umidade relativa do ar da atmosfera em torno das estruturas.

Segundo dados da agência de ciências oceânicas e atmosféricas dos Estados Unidos - NOAA, no século 19, antes da revolução industrial, a concentração de CO_2 na atmosfera era de aproximadamente 280 ppm (partículas por milhão), e em maio de 2013 ultrapassou os 400 ppm. Segundo reportagem do jornal *The New York Times*, estudos científicos indicam que essa concentração é a mais alta dos últimos 3 milhões de anos.

Esse aumento gradativo de CO_2 na atmosfera, é ainda mais preocupante nos grandes centros urbanos e industriais, onde há uma concentração de parques industriais e uma crescente frota de veículos automotores, de modo que a preocupação com a durabilidade das estruturas de concreto em relação ao processo de carbonatação também vem crescendo. Os pesquisadores, na constante busca em atender aos objetivos técnico, econômico e ambiental, vêm estudando a utilização de materiais alternativos para a produção do concreto que, incorporados nele, propiciem um melhor desempenho quanto à durabilidade e vida útil das estruturas.

Diversas pesquisas abordando e investigando a influência das adições minerais reativas, mais especificamente o metacaulim, na durabilidade de materiais cimentícios, chegaram a resultados altamente satisfatórios em relação a processos de deterioração como a corrosão das armaduras induzida pela difusão de íons cloretos, o ataque por sulfatos e a reação álcali-agregado, porém, em relação à carbonatação, há divergências ou alguns resultados que levam a contradições. Há uma tendência da comunidade científica em acreditar que as adições minerais incorporadas ao concreto, essencialmente nas relações a/ag maiores do que 0,50, são prejudiciais à durabilidade das estruturas de concreto no tocante à

carbonatação. Essa tendência normalmente é explicada pelo fato de que a incorporação de adições reduz a reserva alcalina do concreto pela diminuição do hidróxido de cálcio (CH) precipitado na pasta de cimento, seja pela diminuição da formação de CH na hidratação dos produtos anidros do cimento (menor teor de cimento na mistura), seja pelas reações pozolânicas que consomem o CH produzido e o transformam em produtos menos solúveis (C-A-S-H, C-S-H, C-A-H). Segundo alguns pesquisadores, essa menor oferta de CH (principal composto que reage com o CO₂ do ar) diminui a capacidade de proteção dos concretos quanto à ação do CO₂, propiciando maiores velocidades de carbonatação, diminuindo assim a durabilidade e vida útil das estruturas de concreto.

1.2 JUSTIFICATIVA

Nas últimas décadas, devido às mudanças de mentalidade da sociedade de uma maneira geral, tem-se buscado a utilização de materiais com maior durabilidade e vida útil, a fim de atender aos anseios sociais no que diz respeito aos aspectos técnicos, econômicos e ambientais. O concreto, por ser um material que causa grande impacto ambiental, está inserido fortemente neste contexto.

As adições minerais, sejam naturais ou provenientes de resíduos industriais, têm sido cada vez mais estudadas e utilizadas, chegando ao ponto de atualmente ser imprescindível o seu uso em determinados concretos, notadamente quando se almejam determinadas características e propriedades associadas a um desempenho superior. É o caso, por exemplo, dos concretos auto-adensáveis (CAA) e dos concretos de alto desempenho (CAD).

Dentre as adições hoje utilizadas, podem ser citadas a cinza volante (resíduo proveniente das usinas termoeletricas), a sílica ativa (resíduo proveniente das indústrias de ferro-silício ou silício metálico), a escória de alto-forno (resíduo proveniente das siderúrgicas, na etapa de produção do ferro gusa), a cinza da casca de arroz e a cinza do bagaço da cana (resíduos da indústria agrícola) e, por último, o metacaulim (que pode ser obtido de resíduos da indústria do papel e celulose, como também pela calcinação de argilas cauliníticas). No Brasil, a escória de alto-forno e a cinza volante são largamente utilizadas, principalmente pelas indústrias cimenteiras, como adição na produção dos cimentos comerciais; a sílica ativa, também tem sido bastante utilizada na produção de concretos em que se almejam desempenhos superiores; enquanto o metacaulim, a cinza da casca de arroz e a cinza do

bagaço da cana, são ainda pouco utilizadas, devido à falta de estudos mais aprofundados, tanto para o processo de produção, como para as influências sobre as características e propriedades do concreto, ao longo do tempo.

O presente trabalho busca contribuir, procurando responder alguns questionamentos que não foram totalmente elucidados, ou onde ainda não há um consenso entre diversos pesquisadores, tais como: qual a consequência do uso de adições minerais altamente reativas, como o metacaulim, no avanço do processo de carbonatação? Em concretos de uso corrente, é positivo o uso de metacaulim? De que forma ele deve ser incorporado aos concretos, mantendo fixa a relação água/aglomerante ou não? Existe um teor ótimo de adição do metacaulim para o desempenho quanto à carbonatação? Em concretos com alteração de sua estrutura interna pela presença do metacaulim, qual a influência dos aspectos mineralógicos, microestruturais e porosidade do concreto, além de sua resistência mecânica, no tocante ao desempenho quanto à carbonatação?

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral da presente pesquisa é avaliar o desempenho de concretos usuais de mercado com diferentes teores de metacaulim quanto à durabilidade, especificamente verificando o comportamento desses concretos sob a ação acelerada de carbonatação.

Os objetivos específicos são:

- a) Verificar a existência de um teor ótimo de metacaulim em substituição ao cimento para a mitigação do processo de carbonatação e o consequente aumento na durabilidade do concreto.
- b) Avaliar a melhor forma de incorporação do metacaulim em concretos usuais de mercado, sob a ótica do desempenho quanto à carbonatação, se mantendo fixa a relação água/aglomerante ou se padronizando uma faixa de resistência à compressão.
- c) Verificar as alterações microestruturais e de porosidade da pasta de cimento em função dos teores de metacaulim utilizados, bem como decorrentes do avanço do processo de carbonatação, promovendo as discussões pertinentes desses aspectos em relação ao desempenho dos concretos quanto à carbonatação.
- d) Avaliar o teor de hidróxido de cálcio remanescente e outros aspectos mineralógicos dos concretos com metacaulim, em comparação com o concreto básico de referência

(antes e após o ataque de CO_2), verificando a interferência desses aspectos no desempenho em relação à carbonatação.

- e) Avaliar o comportamento da resistência à compressão em função dos teores de metacaulim incorporados ao concreto, como forma de dar suporte às análises e ao estudo da carbonatação.
- f) Avaliar a influência da propriedade de absorção de água no contexto da carbonatação de concretos usuais contendo metacaulim.
- g) Estabelecer correlação entre a profundidade carbonatada e o ganho de massa para os concretos em condições controladas de umidade e temperatura, verificando a viabilidade do monitoramento das profundidades carbonatadas por meio do ganho de massa em pesquisas experimentais feitas em laboratórios.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos.

O primeiro capítulo apresenta a introdução, onde se contextualiza o trabalho de pesquisa, contendo: as considerações iniciais, os objetivos, a justificativa e a sua estrutura.

No segundo capítulo faz-se uma revisão da literatura, com ampla abordagem sobre o material metacaulim, dando enfoque à sua utilização no concreto como adição mineral pozolânica.

O capítulo três aborda o fenômeno da carbonatação nos concretos e argamassas, dando ênfase ao desempenho e à durabilidade desses concretos e argamassas.

O quarto capítulo apresenta o programa experimental, com a caracterização dos materiais empregados, a descrição do método de dosagem do concreto, a produção dos corpos de prova e a apresentação dos métodos de análise empregados.

No quinto capítulo são expostos os resultados, acompanhados de suas discussões, cuja estrutura prevê as análises das características e propriedades do concreto endurecido, o estudo da carbonatação acelerada e as análises da microestrutura dos concretos.

O sexto e último capítulo apresenta as conclusões, as considerações sobre a metodologia utilizada, bem como as sugestões para futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2

METACAULIM

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura sobre o material metacaulim, ressaltando a sua influência dentro do estudo da durabilidade do concreto armado, dando ênfase ao fenômeno da carbonatação. Inicialmente é feita uma conceituação e um breve histórico, logo em seguida, são abordadas a sua produção e obtenção, a sua classificação de acordo com a norma brasileira, os principais aspectos físicos e químicos, a sua pozolanicidade e, por fim, o comportamento do concreto com metacaulim.

2.1 CONCEITUAÇÃO / HISTÓRICO

Sendo de origem grega, o prefixo “meta” é usado para indicar mudança. Ele tem o significado de algo que vem após um estado inicial, além de uma condição que a precede (OLIVEIRA C., 2007; HOLANDA, 2008). Cientificamente, esse prefixo é utilizado para denotar a última hidratação de uma série. No caso do metacaulim, a mudança que ocorre é a desidroxilação advinda da “queima” por período definido.

Na palavra “Metacaulim”, o sentido do prefixo está relacionado à passagem do estado hidratado do caulim para o desidratado, através da desidroxilação da molécula da caulinita provocada por aquecimento durante um determinado tempo. A metacaulinita ou metacaulim, é um produto amorfo (não cristalino) resultante do processo de desidroxilação da caulinita, através da calcinação em temperaturas controladas (GARDOLINSKI, 2002).

O termo caulim ou “*china clay*” deriva da palavra chinesa *Kauling*, que significa colina alta, e se refere a uma colina de Jauchau Fu, ao norte da China, onde o material é obtido, há muito tempo. É formado essencialmente pela caulinita, apresentando, em geral, cor branca ou quase branca, devida ao baixo teor de ferro. É um dos mais importantes e provavelmente um dos seis minerais mais abundantes do topo (profundidade até 10 metros) da crosta terrestre (DNPM, 2008).

Segundo Santos (1992), o termo *china clay* (argila chinesa) é aplicado originalmente ao caulim beneficiado e minerado na Europa, mas atualmente aplicado a todos os caulins

beneficiados de origem inglesa. É usado na Grã-Bretanha para designar os caulins da região de *Cornwall*.

Ainda segundo Santos (1992), são denominadas de caulim as argilas constituídas essencialmente do argilomineral caulinita ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), ou que na sua forma beneficiada, é constituída principalmente por minerais do grupo caulinita, que queima na cor branca. Dois tipos de caulins podem ser reconhecidos, sendo: a) caulim residual - caulim encontrado no local onde é formado pela ação do intemperismo sobre rochas, é o caso da maioria das jazidas conhecidas de caulins de São Paulo, sul de Minas Gerais, Rio de Janeiro, Paraíba e Rio Grande do Norte; eb) caulim sedimentar - é o que foi transportado do seu local de origem e depositado em outros locais devido principalmente à ação da água e dos ventos. O caulim sedimentar apresenta propriedade coloidal mais pronunciada que o caulim residual, justamente por ter sofrido transporte, e têm granulometria menor. É o caso dos caulins dos Rios Jari e Capim, que se encontram na Região Norte, no Estado do Pará. No Brasil, usam-se também os termos caulim primário para designar o caulim residual e caulim secundário para o caulim sedimentar.

O metacaulim é uma pozolana sílico-aluminosa, empregada como adição mineral na produção de concretos especiais, derivada normalmente da calcinação entre $600^\circ C$ e $900^\circ C$, de alguns tipos de argilas, como as caulínicas e os caulins (SOUZA, 2003; GLEIZE; CYR; ESCADEILLAS, 2007; SILVA, 2010). Convencionou-se chamar o metacaulim proveniente de argilas extremamente finas, com elevados teores de caulinita, de metacaulim de alta reatividade (MCAR), que também pode ser obtido por meio do tratamento do resíduo da indústria produtora de cobertura de papel (DAL MOLIN, 2005).

As pozolanas de alta reatividade, também chamadas de superpozolanas (materiais detentores de grande área específica e estrutura interna amorfa ou vítrea), mais conhecidas são a sílica ativa e a cinza da casca de arroz, além do metacaulim de alta reatividade.

2.2 ADIÇÃO MINERAL PARA CONCRETOS

As pozolanas e ou superpozolanas são utilizadas como adições minerais nas produções de cimentos e de concretos, visando um melhor desempenho nas propriedades mecânicas e na durabilidade e vida útil dos materiais compósitos de cimento, argamassas, pastas e principalmente nas estruturas de concreto armado.

A ASTM C 618 (1991) e a NBR 12 653 (ABNT, 2012) definem como pozolana o material silicoso ou sílico-aluminoso, que apresenta poder aglomerante na presença de umidade e em temperaturas próximas à ambiente, reagindo quimicamente com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento. Esta reação secundária resulta, quando da produção de argamassas e de concretos, num aumento do desempenho tecnológico destas misturas, o que, vias de regra, leva a uma diminuição de custo, quando comparado com a mistura sem adição, devido à menor necessidade de cimento para se alcançar as características desejadas.

Um exemplo clássico de adição mineral, muito utilizada nos dias atuais, é a argila calcinada, que adquire propriedades pozolânicas em razão do desordenamento da estrutura cristalina. A argila é um material natural, finamente dividido e constituído, sobretudo, de argilominerais (silicatos hidratados de alumínio). Quanto maior o teor de argilominerais nas matérias primas, maior será a atividade pozolânica das argilas calcinadas.

Mehta e Malhotra (1996) afirmam que o uso de adições provém do período de 1500 a.C., na Grécia, onde se adotava um material de origem vulcânica, originado de erupções ocorridas na Ilha Santorini. Esta afirmação evidencia que o uso de adições minerais na construção é anterior à invenção do cimento Portland, sendo também anterior à adoção do termo pozolana para alguns tipos de adições minerais, haja vista que ele foi utilizado pela primeira vez na Itália, no ano 300 a.C., para descrever as cinzas vulcânicas provenientes da Vila de Pozzuoli, próxima à cidade de Nápoles.

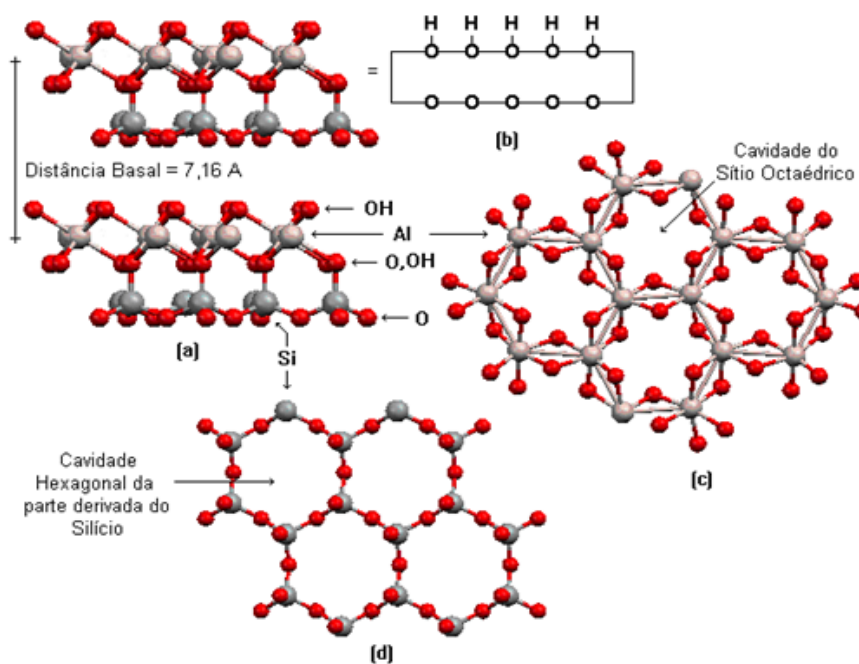
Segundo Lea (1970), o uso destas adições tornou-se muito difundido em todo o Império Romano na execução de suas construções, como material cimentante. No ano de 79, tinha-se como principal fonte deste tipo de material, as cinzas vulcânicas oriundas do Monte Vesúvio, que provocou a destruição de várias cidades localizadas na baía de Nápoles, entre elas Pompéia e Herculano. Neste período, também foram adotados outros tipos de adições com origem vulcânica, como exemplo, na Alemanha, onde se utilizava materiais denominados de tufos vulcânicos.

Contudo, a busca de adições para uso na produção de argamassa e de concreto não se restringiram somente aos materiais de origem vulcânica. Foram adotados posteriormente, em outras regiões, materiais como a argila calcinada. Atualmente, devido a interesses econômicos e ambientais, procura-se aumentar o consumo de adições minerais no concreto,

tendo como principal fonte, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), pozolanas provenientes de resíduos industriais como a sílica ativa, oriunda da indústria eletrônica, as cinzas volantes, das usinas termoelétricas, e as cinzas da casca de arroz, da agricultura.

Os argilominerais mais utilizados para a produção de pozolanas são as caulinitas montmorilonitas e as ilitas (SANTOS, 1992). O argilomineral caulinita é formado pelo empilhamento regular de lamelas, onde cada uma consiste em uma folha de tetraedros de sílica e outra de octaedros de gibbsita, sendo que as lamelas são ligadas entre si pelas ligações de hidrogênio, produzindo uma estrutura altamente coesa como mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1- Representação esquemática da estrutura da caulinita (a). Representação esquemática da lamela (b), visão superior (c) e inferior (d) da lamela. (WYPYCH; SATYANARAYANA, 2004).



Por meio de imagens do microscópio eletrônico de varredura, são mostrados na Figura 2.2 os cristais de caulinita, e na Figura 2.3a caulinita e o metacaulim, obtidos dos resíduos de beneficiamento do caulim.

Figura 2.2- Visualização de cristais de caulinita (a, b) (WYPYCH; SATYANARAYANA, 2004).

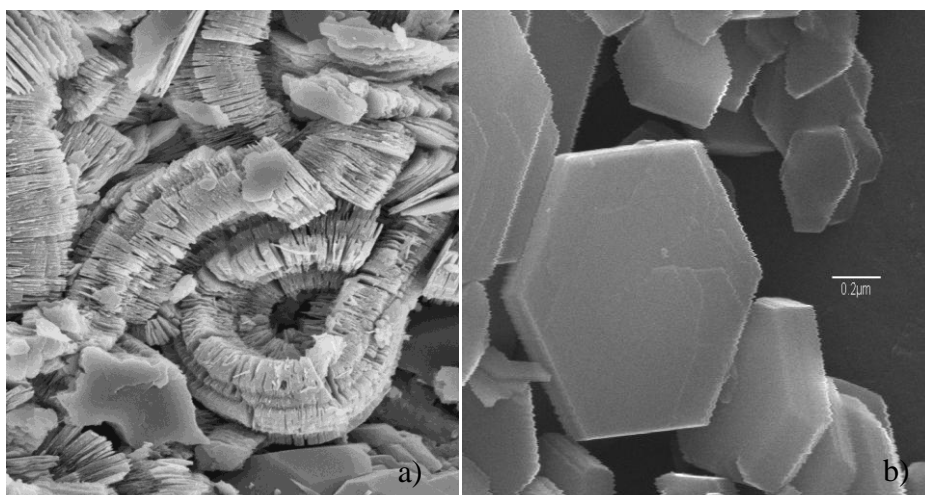
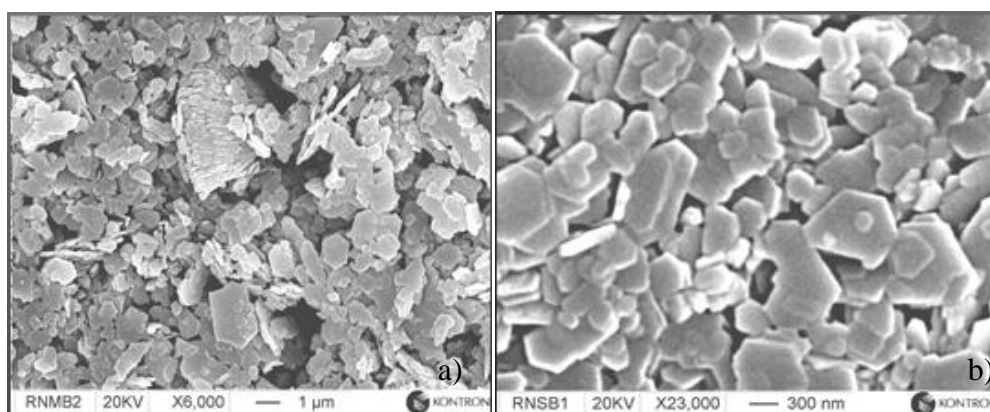


Figura 2.3- Visualização da caulinita a) e, b) da metacaulinita (BARATA; DAL MOLIN, 2002).



2.3 PRODUÇÃO E OBTENÇÃO

A primeira forma de obtenção do metacaulim foi por meio da calcinação de argilascauliníticas. Segundo Metha e Malhotra (1996), esta pozolana tem sido obtida através da calcinação e da moagem de argilas especiais como o caulimmuito puro, sendo esta afirmação ainda válida para os dias atuais. Neste processo, é obtida uma pozolana com alta atividade pozolânica, fazendo comque receba a denominação de metacaulim de alta reatividade. Além da altareatividade, esta pozolana tem se tornado, pela sua cor clara, muito atrativa quando seutiliza o concreto com fins arquitetônicos.

Dentre os diversos caulins utilizados para aprodução de pozolanas, citam-se, por exemplo, a caulinita e a haloisita que quandoconvertidas em metacaulim são denominadas,

respectivamente, metacaulinita e metahalosita. A conversão de caulim em metacaulim é apresentada na Equação 2.1 (NASCIMENTO, 2009).



Uma segunda forma de obtenção é por meio da calcinação e moagem de rejeitos provenientes das indústrias mineradoras e beneficiadoras que visam a produção de caulins do tipo *coating* (revestimento) e *filler* (enchimento) a serem utilizados para cobertura e preenchimento na produção de papel. Dentre os primeiros trabalhos com este tipo de rejeito, destaca-se o realizado por Pera e Amrouz (1998), que obteve excelente atividade pozolânica, quando calcinado com temperaturas entre 700°C e 750°C, por um período de 2 horas a 5 horas. Na comparação com os dois tipos de MCAR disponíveis comercialmente realizadas no referido trabalho, verificaram-se valores superiores de consumo de Ca(OH)₂ no MCAR proveniente de rejeito. Outro trabalho com este tipo de rejeito, visando à produção do CAD, realizado por Barata (1998), ratificou o potencial pozolânico deste material.

Por último, tem-se também a possibilidade de obtenção do MCAR através de outro tipo de resíduo proveniente de blocos cerâmicos. Este apresenta, segundo Cordeiro *et al.* (2002), após o processo de moagem, uma atividade pozolânica acima do mínimo estabelecido pela NBR 12 653 (ABNT, 2012). Em argamassas, com o uso de um teor de substituição de 20%, esta atividade pode ser refletida em melhoria no 28º dia de idade de aproximadamente 25%, em relação à mistura de referência. No concreto, como uso de um teor de substituição de 15%, a melhoria foi de aproximadamente 30%.

Segundo Souza e Dal Molin (2002), para que a argila caulínica possa desenvolver a atividade pozolânica, existe a necessidade da mesma, sofrer um processo de calcinação em temperaturas entre 500°C e 800°C e posteriormente, a moagem, visando diminuição da sua granulometria. Quando o processo de moagem reduz o tamanho das partículas a valores inferiores a 5 µm, constata-se uma melhora significativa na atividade pozolânica, sendo denominado por alguns autores como metacaulim de alta atividade. Esta capacidade pozolânica faz com que este material possa substituir parte do cimento no concreto com o objetivo de aumentar a sua durabilidade e resistência. Porém, em relação à durabilidade,

nem sempre essa afirmação será verdadeira, dependerá das características do concreto e do ambiente a que estará exposto.

A produção do metacaulim de alta reatividade pode apresentar problemas devido ao tratamento térmico e ao processo de moagem, haja vista que geralmente este material tende a apresentar características variadas decorrentes da natureza e da finura da argila empregada. Em função desta variabilidade, os fatores relacionados à calcinação, como temperatura e tempo de queima, e os relacionados à moagem, como tempo e tipo de moinho, passam a ter uma grande importância, visando a garantia da pozolanicidade das argilas, quando calcinadas a baixas temperaturas.

Visando melhorar o processo de produção, outro método de calcinação foi estudado e proposto por Nascimento (2009), chamado de queima rápida (*flash*), que consiste na queima, em décimos de segundo, onde acontece a desidroxilação dos argilominerais caulínicos pulverizados, que passam por um duto onde se sopra uma quantidade de ar quente, a uma determinada temperatura que, em contato com o material, faz-se obter o metacaulim. Esse método mostrou-se eficiente, uma vez que houve toda a transformação da fase caulinita para metacaulinita. Constatou-se que o processo de desidroxilação das caulinitas ocorre na faixa de 430°C a 560°C, sendo que a melhor temperatura de calcinação para os materiais utilizados ficou na faixa de 500°C a 900°C.

2.4 CLASSIFICAÇÃO CONFORME NORMALIZAÇÃO BRASILEIRA

Os materiais pozolânicos, de maneira geral, são regulamentados pela norma NBR 12 653 (ABNT, 2012) que conceitua e classifica esses materiais de acordo com três grupos denominados como classes “N”, “C” e “E”, e também quanto à sua origem em dois grupos denominados de Naturais e Artificiais.

Denominação das classes dos materiais pozolânicos:

- a) Classe N: pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos químicos e físicos da NBR 12 653 (ABNT, 2012), como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “*cherts*” (quartzo) silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.

- b) Classe C: cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas que obedece aos requisitos da NBR 12 653(ABNT, 2012).
- c) Classe E: qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido na NBR 12 653(ABNT, 2012). Vale mencionar que alguns materiais que se enquadram nesta classe podem apresentar propriedades aglomerantes.

Quanto à origem, a NBR 12 653(ABNT, 2012) classifica os materiais pozolânicos em:

- a) Naturais: materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido ou de origem sedimentar.
- b) Artificiais: materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica.

A referida norma ainda ressalta que as pozolanas consideradas artificiais são subdivididas em argilas calcinadas, cinzas volantes e outros materiais, conforme descrito a seguir:

- a) Argilas calcinadas: materiais provenientes da calcinação de determinadas argilas que, quando tratadas a temperaturas entre 500°C e 900°C, adquirem a propriedade de reagir com o Ca(OH)_2 .
- b) Cinzas volantes: resíduos finamente divididos provenientes da combustão de carvão pulverizado ou granulado com atividade pozolânica.
- c) Outros materiais: são considerados ainda como pozolanas artificiais, portanto materiais não tradicionais, escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais e rejeito de carvão mineral.

O metacaulim estaria, então, de acordo com a NBR 12 653(ABNT, 2012), inserido na classe “N” e classificado como material artificial, porém em 2010, a ABNT publicou uma norma específica para esse material, a NBR 15 894(ABNT, 2010), estabelecendo conceitos e requisitos para a adequação do material produzido e comercializado no país.

Segundo a NBR 15 894-1(ABNT, 2010), o metacaulim é um produto de calcinação em uma amoagem de argilominerais caulíníticos. Constitui um tipo de pozolana formada, essencialmente, por partículas lamelares com estrutura predominantemente não cristalina. Em seu Anexo A (informativo), fala sobre a influência do metacaulim nas propriedades dos compósitos concreto, argamassa e pasta. O produto metacaulim que atende aos requisitos dessa parte da NBR 15 894-1(ABNT, 2010), é uma pozolana de alta

reatividade. As interações física e química com o cimento Portland modificam a reologia dos compostos concreto, argamassa e pasta, no estado fresco, e confere propriedades especiais relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico no estado endurecido. A elevada área superficial melhora aspectos reológicos através da otimização da distribuição granulométrica da pasta, contribuindo na retenção de água, aumento da coesão, redução da exsudação e segregação, facilitando o acabamento final. O metacaulim também acelera o processo de hidratação do cimento Portland, atua como fíler e reage com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ proveniente da hidratação do cimento, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. Essas contribuições conferem aos compostos (concreto, argamassa e pasta) propriedades especiais relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico, quando comparadas às propriedades desses compostos sem a sua presença, tais como:

- a) aumento da resistência à compressão e à flexão;
- b) redução da porosidade e permeabilidade;
- c) aumento da resistência a sulfatos;
- d) resistência à difusibilidade de íons cloreto;
- e) mitigação da reação álcali-agregado;
- f) redução da ocorrência de eflorescência;
- g) aumento da resistividade elétrica.

As propriedades no estado fresco e endurecido dos compostos concreto, argamassa e pasta, conferidas pelo metacaulim, quando comparadas às propriedades de compostos sem a sua presença, dependem do teor adicionado em relação à massa de cimento Portland, do proporcionamento dos materiais (traço), incluindo os aditivos, do tipo de preparo, lançamento, adensamento, condições de cura e outros. Os requisitos químicos e físicos requeridos pela norma NBR 15 894-1 (ABNT, 2010) estão demonstrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Requisitos químicos e físicos do metacaulim, conforme NBR 15 894-1 (2010).

Componente	Unidade	Limite	Método de ensaio
SiO ₂	%	≥ 44,0 e ≤ 65,0	ABNT NBR NM 22 ou ABNT NBR 14 656
Al ₂ O ₃	%	≥ 32,0 e ≤ 46,0	ABNT NBR NM 11-2 ou ABNT NBR 14 657
CaO + MgO	%	≤ 1,5	ABNT NBR NM 11-2 ou ABNT NBR 14 658
SO ₃	%	≤ 1,0	ABNT NBR NM 16
Na ₂ O	%	≤ 0,5	ABNT NBR NM 17
Equivalente alcalino em Na ₂ O	%	≤ 1,5	ABNT NBR NM 17
Umidade	%	≤ 2,0	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	%	≤ 4,0	ABNT NBR NM 18
Resíduo na peneira com abertura de malha de 45 µm	%	≤ 10,0	ABNT NBR 15 894-3
Índice de desempenho com cimento aos 7 dias	%	≥ 105	ABNT NBR 15 894-2
Índice de atividade pozolânica Chapelle (opcional)	mg _{Ca(OH)₂} /g _{material}	≥ 750	ABNT NBR 15 895
Área específica B.E.T. (opcional)	m ² .g ⁻¹	≥ 15	ASTM C-1069

A análise química, incluindo a perda ao fogo, deve ser realizada na base seca, ou seja, após determinação do teor de umidade a (105 ± 5)°C.

A critério do consumidor, podem ser solicitados os ensaios de atividade pozolânica pelo método preconizado pela ABNT NBR 15895 (método de Chapelle) e ensaio para determinação da área específica pelo método ASTM C-1069, de acordo com o princípio proposto por Brunauer, Emmett e Teller (B.E.T.), que devem, quando solicitados, atender aos valores mínimos apresentados.

Nota: equivalente alcalino em Na₂O → Na₂O_{eq} = 0,658 %K₂O + %Na₂O.

2.5 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

Neste item são apresentadas as principais características do metacaulim, abordando os aspectos físicos, químicos, e a pozolanidade do material.

2.5.1 Características físicas

Segundo Mehta e Malhotra (1996) as características físicas, como tamanho das partículas e área específica são um dos principais fatores que podem garantir a alta atividade pozolânica. Todavia, durante o tratamento térmico tem-se a aglomeração das

partículas, que resultam no aumento de sua granulometria. Este comportamento faz com que sempre haja necessidade, quando se usa argilas calcinadas, da realização de moagem, para que tanto o metacaulim quanto o MCAR possam alcançar todo o potencial de sua atividade pozzolânica.

Segundo Zhang e Malhotra (1995), em relação ao MCAR, para assegurar o desempenho especificado em norma para este tipo de pozolana, são necessários uma menor quantidade de material retido na peneira 45 μm e uma maior superfície específica.

Segundo Siddique (2008), 99,9% do metacaulim utilizado em seus estudos, é constituído por partículas menores do que 16 μm , com um tamanho médio de 3 μm (medida por granulometria de difração *laser* Microtrac). Algumas propriedades físicas do metacaulim estudado são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2- Propriedades físicas do metacaulim (SIDDIQUE, 2008).

Propriedades	Valores
Massa específica (g/cm^3)	2,60
Densidade (g/cm^3)	0,3-0,4
Forma física	pó
Cor	branco fosco
Brilho ge	79-82

2.5.2 Características químicas

As características químicas do metacaulim devem ser observadas segundo dois aspectos principais, ou seja, na sua composição e no arranjo de suas moléculas (estrutura interna amorfa). O primeiro aspecto está diretamente relacionado à argila utilizada para a produção da pozolana (SOUZA, 2003). Segundo Mehta e Malhotra (1996) a metacaulinita de alta reatividade é a única que não é caracterizada pelo alto teor de sílica, tendo geralmente proporções semelhantes de SiO_2 e Al_2O_3 , em massa. Os principais constituintes do metacaulim são SiO_2 e Al_2O_3 e a sua composição química típica é dada na Tabela 2.3, conforme relatado por Ambroise, Maximilien e Pera (1994).

Tabela 2.3- Composição química típica de metacaulim (AMBROISE; MAXIMILIEN; PERA, 1994).

Ingredientes	% em peso
SiO ₂	51,52
Al ₂ O ₃	40,18
Fe ₂ O ₃	1,23
CaO	2,0
MgO	0,12
K ₂ O	0,53
SO ₃	0,0
TiO ₂	2,27
Na ₂ O	0,08
L.O.I	2,01

A composição química, mesmo não sendo, segundo Zampieri (1989), um parâmetro adequado para a avaliação da pozolanicidade, pois impossibilita a diferenciação entre a sílica amorfa e a cristalina, apresenta-se como uma forma de controle de produção ou de recepção de uma argila. Souza (2003) fez um levantamento das exigências químicas para as pozolanas do tipo metacaulim em alguns países e apresenta na Tabela 2.4, a seguir, onde compara as descritas pelas normas indiana, americana e brasileira.

Tabela 2.4- Exigências químicas do metacaulim (adaptada de: Souza, 2003).

Exigências químicas	IS 1344 - 1968	ASTM C 618 -1991	NBR 12 653 - 2012
Al ₂ O ₃ + SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ –mín.	70%	70%	70%
SiO ₂ – mín.	40%	-	-
CaO – máx.	10%	-	-
MgO – máx.	3%	-	-
SiO ₃ – máx.	3%	4%	4%
Na ₂ O + K ₂ O – máx	3%	-	-
Teor de umidade – máx.	-	3%	3%
Álcalis solúveis em água – máx.	0,1%	-	-
Álcalis disponíveis em Na ₂ O – máx .	-	1,5%	1,5%
Material solúvel em água – máx.	1%	-	-
Perda ao fogo – máx.	5%	10%	10%

A partir da publicação da norma NBR 15 894-1 (ABNT, 2010), que estabeleceu novos requisitos químicos específicos para o metacaulim, se chegou a parâmetros mais condizentes com as características do material produzido e comercializado no Brasil, que é uma pozolana de alta reatividade.

2.5.3 Pozolanicidade do material

Segundo Oliveira C. (2007), a atividade pozolânica de um material está relacionada à sua composição mineralógica, ou seja, ao teor de sílica amorfa ou não cristalina. No caso das argilastermicamente ativadas, esse componente está associado à porcentagem de argilomineral presente.

É sabido que a ativação térmica ao ar de muitos minerais argilosos leva, por desidratação, a uma quebra total ou parcial das estruturas cristalinas do mineral para formar uma fase de transição com alta reatividade. Um exemplo típico é a obtenção do metacaulim ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ou AS_2), que ocorre com a calcinação de argilas ricas em caulinita.

Souza (2003) ressalta que a atividade pozolânica das argilas calcinadas depende da natureza (tipo, grau de cristalização e composição mineralógica) e do conteúdo do argilomineral presente, da finura do material e das condições de calcinação (equipamento, tempo e temperatura). Além do que, limita-se devido à presença de minerais pozolanicamente inertes como quartzo, feldspato, óxidos e hidróxidos de ferro, entre outros.

A determinação da atividade pozolânica de qualquer material pode ser realizada por ensaios mecânicos com cimento Portland de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2012) e, também, com o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de acordo com a NBR 5751 (ABNT, 2012). Com a publicação da norma NBR 15 894 (ABNT, 2010), específica para o metacaulim, a orientação para a determinação do índice da atividade pozolânica com o cimento, passou a ser verificado de acordo com a NBR 15 894-2 (ABNT, 2010) e o índice de atividade pozolânica com a cal de acordo com a NBR 15 895 (ABNT, 2010), conhecido como método de Chapelle.

A NBR 5752 (ABNT, 2012) constitui um método seguro e real, pois revela a verdadeira ação pozolânica do material estudado na matriz cimentícia (ZAMPIERI, 1993), embora esses resultados possam variar em razão das características físicas e mineralógicas de cada cimento. Nesse ensaio, preparam-se argamassas em dois traços distintos, sendo um de

referência e o outro, com substituição de 35% do volume de cimento por pozolana. O índice de pozolanicidade é definido pela relação da resistência aos vinte e oito dias entre as duas argamassas. Um material para ser considerado como pozolânico, deve apresentar um índice igual ou superior a 75%.

Uma vez considerada variante da NBR 5752(ABNT, 2012), a pozolanicidade também pode ser constatada através da NBR 5751(ABNT, 2012). Nesse ensaio, são confeccionadas argamassas que contenham dois volumes de pozolana para um volume de Ca(OH)_2 . Para esse caso, a determinação da resistência é aos setedias de idade e o material será considerado pozolânico se as argamassas apresentarem valores superiores a 6,0 MPa. Na Tabela 2.5 são apresentadas as exigências físicas para os materiais pozolânicos segundo a NBR 12 653(ABNT, 2012).

Tabela 2.5- Exigências físicas para os materiais pozolânicos (NBR 12 653, 2012).

Propriedades	Classes		
	N	C	E
Material retido na peneira 45 μm , % máx.	34	34	34
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mín.	75	75	75
Índice de atividade pozolânica com o Ca(OH)_2 aos 7 dias, em MPa	6,0	6,0	6,0
Água requerida, % máx.	115	110	110

Apesar da pureza e da uniformidade do Ca(OH)_2 facilitar o controle dos resultados obtidos, o ensaio não retrata a situação mais comum proporcionada pela hidratação dos cimentos (ZAMPIERI, 1993). Na Tabela 2.6 são apresentadas as exigências químicas para os materiais pozolânicos, segundo a NBR 12 653(ABNT, 2012).

Tabela 2.6- Exigências químicas para os materiais pozolânicos (NBR 12 653, 2012).

Propriedades	Classes		
	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_3$, % mín.	70	70	50
SO_3 , % máx.	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade, % máx.	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo, % máx.	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na_2O , % máx.	1,5	1,5	1,5

Em outro exemplo, Zampieri (1993) empregou um método alternativo para a verificação da atividade pozolânica utilizado por pesquisadores do *Institut National des Sciences Appliquées* (INSA). Esse método está baseado na maior resistência à compressão de amostras confeccionadas em variadas proporções pozolana/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Apresenta como vantagem a possibilidade de visualização da quantidade exata de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ consumida por qualquer tipo de pozolana, mediante a obtenção da “curva de resistência”.

Independentemente dos ensaios citados para previsão de atividade pozolânica de materiais, outros métodos baseados na caracterização mineralógica podem auxiliar na identificação dos materiais pozolânicos. Entre eles a difratometria de raios X(DRX) e, de modo suplementar, a análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD-TG) tem grande importância na caracterização da estrutura amorfa e desordenada, além de fases inertes, essas são capazes de minorar a atividade pozolânica (BATTAGIN, 1987; PRICE, 1981).

2.6 CONCRETO COM METACAULIM

O metacaulim quando incorporado ao concreto, assim como outras adições minerais pozolânicas de alta reatividade, promovem mudanças em sua microestrutura, e elas trazem reflexos nas características do concreto nos seus estados fresco e endurecido e, também, na sua durabilidade. A seguir serão apresentados alguns desses aspectos.

2.6.1 Microestrutura do concreto

O termo microestrutura é usado para a porção com grandeza microscópica da macroestrutura, e o termo macroestrutura geralmente é usado para a microestrutura grosseiramente visível a olho nu. O tipo, a quantidade, o tamanho, a forma e a distribuição das fases presentes em um sólido constituem a sua microestrutura. O concreto tem uma microestrutura altamente complexa e heterogênea, e as três fases constituintes consideradas são: a pasta de cimento hidratada, os agregados e, a zona de transição na interface entre a pasta e o agregado. O conhecimento tanto da microestrutura e das propriedades individuais dos constituintes do concreto, quanto da relação entre eles servem para auxiliar no controle de suas propriedades. O progresso no campo dos materiais resultou, principalmente, no reconhecimento do princípio de que as propriedades têm origem na microestrutura interna, ou seja, as propriedades podem ser modificadas fazendo alterações na microestrutura de um material (METHA; MONTEIRO, 2008).

A zona de transição entre pasta e agregado é considerada como o elo mais fraco do concreto. Diversos materiais têm sido empregados na fabricação de concretos com o intuito de melhorar as propriedades físicas e químicas nesta interface.

O emprego de pozolanas, seja em substituição ou como adição à massa de cimento, proporciona melhorias físico-químicas na interface agregado pasta de cimento, corroborando para o aumento da resistência e da durabilidade do concreto. Essas melhorias ocorrem porque o CH produzido nas reações de hidratação de cimento reage com a pozolana para formar produtos de hidratação secundários (C-S-H de baixa densidade) que preenchem os vazios grandes, refinam a estrutura dos poros e reduzem a espessura e a microfissuração da zona de transição; consequentemente, a permeabilidade do sistema é reduzida e há um aumento na resistência mecânica e na durabilidade do concreto. E mais, a adição de pozolanas, especialmente as altamente reativas, faz com que haja uma série de transformações em sua microestrutura, que têm origem na sua ação química e física (SOUZA, 2003).

Na ação química, a introdução de pozolanas proporciona uma reação com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que resulta na formação de compostos estáveis, tais como silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, que são os principais responsáveis pela resistência das pastas de cimento hidratadas.

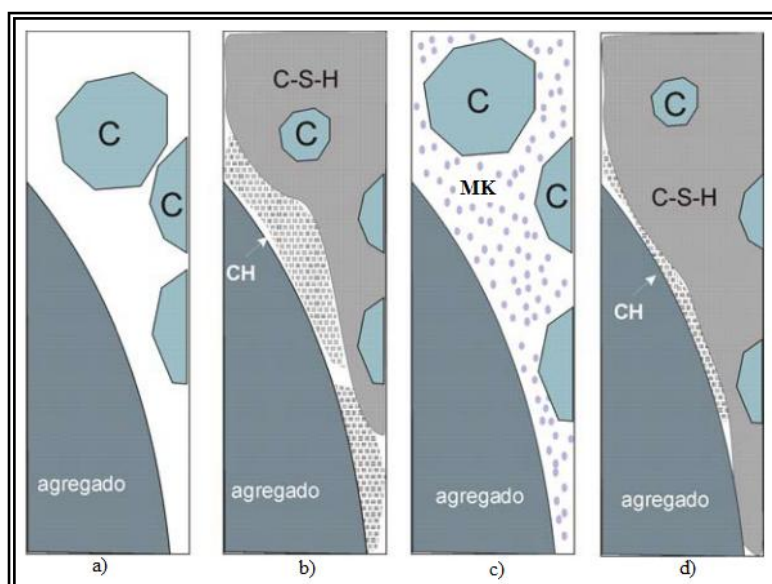
O efeito da ação física no concreto pode se apresentar de três formas:

- a) aumento da densidade da mistura pelo maior preenchimento dos vazios, decorrente principalmente das minúsculas partículas destas pozolanas, normalmente mais finas que as partículas de cimento. Este efeito é definido como microfíler;
- b) grande número de pequenos cristais ao invés de poucos cristais de grande tamanho, devido aos menores espaços disponíveis para os produtos de hidratação crescerem. O menor espaço ocorre pelo fato da pozolana agir como ponto de nucleação para os produtos de hidratação, resultando no refinamento da estrutura dos poros e dos produtos de hidratação do cimento;
- c) densificação da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, devido à interferência na movimentação das partículas de água livre em relação aos sólidos da mistura. A alteração na movimentação provoca a eliminação ou redução do acúmulo de água que comumente fica retido sob o agregado. Este efeito ainda é acompanhado

dadiminuição do número de vazios entre as partículas de cimento e a superfície do agregado(efeito microfíler) e da redução da concentração de hidróxido de cálcio nesta região doconcreto (ação química)(SOUZA, 2003).

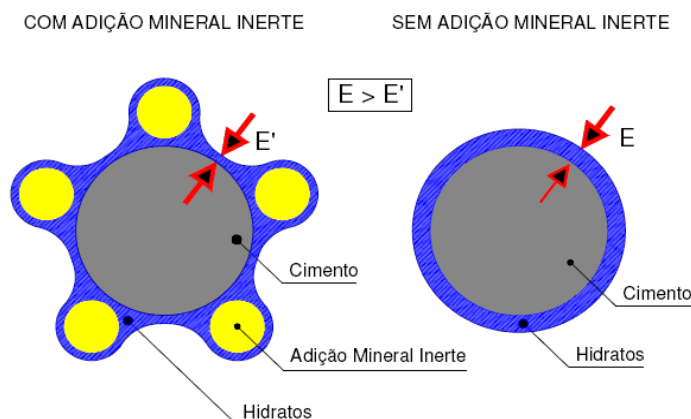
Tem-senasFiguras 2.4 e 2.5 as representações esquemáticas desses efeitos onde, na Figura 2.4observa-se a influência das adições minerais na formação da zona de transição e, na Figura 2.5a influência das adições minerais como pontos de nucleação na hidratação do cimento nas primeiras idades.

Figura 2.4- Influência do metacaulim na formação da zona de transição: a) e b) mistura composta apenas por cimento; c) e d) mistura composta por cimento e metacaulim, sequencialmente antes e após as reações pozolânicas. “C” representa a partícula de cimento e “MK” as de metacaulim (BENTUR; ODLER^{2,1}, 1996 *apud* CASTRO, 2003).



^{2,1} BENTUR, A.; ODLER, I. **Interfacial transition zone in concrete**. London, E&FN Spon, 1996.

Figura 2.5- Representação esquemática da hipótese sobre a majoração da hidratação do cimento nas primeiras idades (LAWRENCE; CYR; RINGOT^{2.2}, 2003 *apud* HOPPE FILHO, 2008).



2.6.2 Influências nas propriedades do estado fresco

Serão consideradas como principais influências no estado fresco, o consumo de água, os aspectos reológicos, o calor de hidratação e a fissuração do concreto.

2.6.2.1 Consumo de água

Observa-se que, embora todas as adições tendam a melhorar a coesão e trabalhabilidade do concreto fresco, muitas não possuem a capacidade redutora de água. Para uma determinada consistência do concreto, o uso de materiais com alta área superficial específica, como as pozolanas altamente reativas, aumentam a demanda de água (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Souza (2003) relata que o uso do MCAR no concreto, assim como as demais pozolanas de alta reatividade, resulta normalmente no aumento da demanda de água, quando comparado com o concreto sem o uso de adições minerais para a obtenção da mesma consistência. Na comparação da demanda de água entre concretos com adição de sílica ativa e metacaulim, Caldarone, Gruber e Burg (1994) constataram redução de 25% a 35% no consumo de aditivos superplastificantes no concreto com metacaulim, também obtiveram uma redução de 28% no consumo de aditivo superplastificante no concreto com metacaulim em relação ao concreto com sílica ativa.

^{2.2} LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixture in mortars, Effect of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 33, Issue 12, p. 1939-1947, 2003.

Mehta e Malhotra (1996), tendo como base várias pesquisas com o uso de 10% de sílica ativa, constataram que o aumento da necessidade de água por parte da mistura não é constante; em concretos com baixo consumo de cimento (100 kg/m^3) há um decréscimo da demanda de água com a adição de sílica ativa, enquanto que, em concretos com maior consumo ($>250 \text{ kg/m}^3$), a demanda de água aumenta com a adição de sílica ativa.

De um modo geral, é consenso entre os pesquisadores que o problema da maior necessidade de água no concreto, devido à inclusão de pozolanas altamente reativas, é resolvido com o uso de superplastificantes (CARMO, 2006).

2.6.2.2 Aspectos reológicos

Segundo Silva (2010), a coesão e a viscosidade do concreto no estado fresco são influenciadas pelas adições minerais, sobretudo quando seus diâmetros médios são inferiores aos do cimento. Porém, mesmo quando o diâmetro médio das adições minerais é semelhante ao do cimento, a sua menor massa específica faz com que a substituição em relação à massa de cimento resulte em maior volume de aglomerante, o que também influencia as propriedades reológicas. Usualmente, em pesquisas experimentais, são feitas correções na quantidade (em massa) do aglomerante que está sendo substituído, de modo a se manter o mesmo volume específico do cimento que está sendo substituído.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a incorporação de partículas finamente divididas com misturas de concreto fresco que tendem a exsudar e segregar, normalmente melhora a trabalhabilidade pela redução de tamanho e volume de vazios. Quanto mais fina for a adição mineral, menor a quantidade necessária para elevar a coesão e trabalhabilidade da mistura do concreto fresco.

Carmo (2006) concluiu em seus estudos, que os concretos compostos com sílica ativa e com o metacaulim de alta reatividade, na proporção de 8% em substituição ao cimento, apresentaram melhor desempenho que os concretos de referência, em termos da trabalhabilidade das misturas.

Segundo Souza (2003), o uso do MCAR, assim como ocorre no concreto com sílica ativa e com a cinza de casca de arroz, resulta numa exsudação extremamente inferior à obtida no concreto de referência. Neste caso, tem-se novamente como origem de tal comportamento

a extrema finura do MCAR, que provoca o melhor empacotamento dos grãos, reduzindo o número de canais ascendentes de água.

Basheeret *al.*^{2,3} (1999 *apud* SOUZA, 2003), avaliando a influência da adição de MCAR na trabalhabilidade do concreto, verificaram que mesmo com menores valores de abatimento, a mistura apresenta facilidade de lançamento e adensamento. A maior facilidade de lançamento, adensamento e acabamento evidenciada com o uso do MCAR é decorrente de sua distribuição granulométrica. Esta pode ser controlada durante a sua produção, tornando-se deste modo, uma vantagem do MCAR quando comparada com outras pozolanas de alta reatividade que não possuem este controle, como a sílica ativa, por exemplo.

2.6.2.3 Calor de hidratação

Os compostos de cimento Portland são produtos de reações a altas temperaturas que não estão em equilíbrio e, assim, estão em estado de alta energia. Quando um cimento é hidratado, os compostos reagem com água para adquirir estados estáveis de baixa energia, e o processo é acompanhado pela liberação de energia em forma de calor. Em outras palavras, as reações de hidratação dos compostos do cimento Portland são exotérmicas. A quantidade de calor total liberada e as taxas de liberação de calor de hidratação de compostos individuais podem ser usadas como índices de suas reatividades. As taxas de evolução de calor podem ser controladas por meio das proporções dos compostos individuais e, também, pelo controle da finura do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

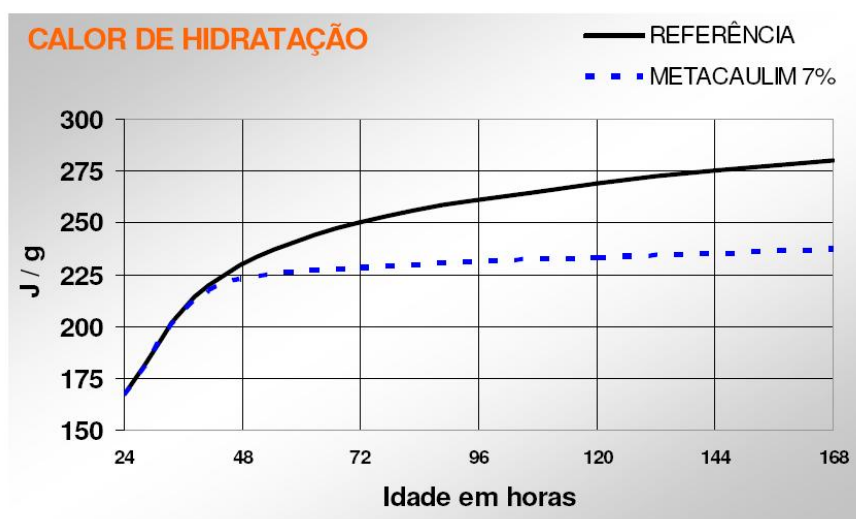
Normalmente o calor de hidratação gerado por unidade de tempo é reduzido com a substituição do cimento por adições. Com isso, o aumento de temperatura em grandes massas de concreto pode ser reduzido com o emprego de cimentos com adições minerais de reações mais lentas (SILVA, 2010).

Segundo Rocha (2005), o metacaulim tem sido utilizado no sentido de minimizar e controlar a liberação de calor nas reações de endurecimento do concreto, em substituição parcial do cimento Portland, com percentuais que variam de 10% a 20%. A

^{2,3}BASHEER, P. A. M.; McCABE, C. C.; LONG, A. E. The influence of metakaolin on properties of fresh and hardened concrete. *In: INFRAESTRUTURE REGENERATION AND REHABILITATION IMPROVING THE QUALITY OF LIFE THROUGH BETTER CONSTRUCTION: Vision for the next millennium. Proceedings...* Sheffield: R.N. Swamy, 1999.

Figura 2.6 mostra a evolução da liberação de calor medida pelo método da Garrafa de Langavant. Na amostra de referência, foi utilizado o cimento CP III 40, reconhecido de baixo calor de hidratação. Entretanto, na amostra com metacaulim, foi utilizado apenas 7% em substituição ao cimento, e, mesmo assim, o calor total liberado neste traço foi em torno de 20% menor, após 168 horas de ensaio.

Figura 2.6- Liberação de calor em pasta de cimento (ROCHA, 2005).



Contudo, este comportamento tende a ser diferente quando se adota o MCAR, devido à sua alta finura. Ambroise, Maximilien e Pera (1994) verificaram aumentos, em relação à mistura de referência, de 1°C, 6°C e 8°C, em pastas com substituições de 10%, 20% e 30% de MCAR, respectivamente, confirmando deste modo o efeito acelerador desta pozolana sobre o processo de hidratação do cimento. Este comportamento também foi obtido por Bai e Wild (2002) quando do uso de teores de substituição de 10% e 15% em argamassas. Zhang e Malhotra (1995) num trabalho experimental em concretos, que envolveu uma mistura com 10% de MCAR, outra com 10% de sílica ativa, obtiveram resultados que evidenciam um panorama em que não oferece possibilidade de diminuição do calor de hidratação. Os autores creditam estes resultados à alta reatividade do metacaulim com o Ca(OH)_2 . Utilizando argamassas, Sabir, Wild e Bai (2001), também constataram ligeiro aumento no calor de hidratação nas argamassas com sílica ativa e MCAR, em relação à argamassa de referência.

Os comportamentos discrepantes relatados entre os diversos pesquisadores, relacionados à influência do MCAR no calor de hidratação, podem ser decorrentes de diferenças existentes na sua pureza e na sua granulometria. Esta situação evidencia claramente a necessidade de

um maior número de pesquisas visando esclarecer, de modo mais preciso, a influência das características físicas e mineralógicas do MCAR nesta propriedade.

2.6.2.4 Fissuração por dessecação superficial e retração plástica

Retração plástica é a redução no volume do concreto fresco ocorrida após o seu assentamento nas fôrmas, enquanto ainda está em estado plástico. Como resultado da retração de pré-endurecimento, fissuras se desenvolvem acima das obstruções do assentamento uniforme, que são, por exemplo, barras de armaduras e grandes partículas de agregados. Nas lajes, a secagem rápida do concreto fresco causa retração plástica quando a taxa de perda de água da superfície excede a taxa disponível de água exsudada. Ao mesmo tempo, fissuras surgem quando o concreto próximo à superfície já se tornou muito rijo para fluir, mas não está resistente o suficiente para suportar as tensões de tração causada pela retração restringida. As fissuras típicas da retração plástica são paralelas entre si, sendo as fissuras contíguas afastadas umas das outras de 0,3 m a 1 m, com 25 mm a 50 mm de profundidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Como as adições minerais normalmente reduzem a exsudação, o que dificulta a subida de água até a superfície, existe um potencial risco de fissuração em decorrência da retração por secagem quando se usam cimento com adições minerais, particularmente quando elas são empregadas em teores mais elevados e quando a taxa de evaporação de água é mais intensa. A cura, portanto, é de extrema importância quando da utilização de cimentos com adições minerais (SILVA, 2010).

Rols *et al.*^{2.4}(1999 *apud* SOUZA, 2003) constataram que a presença de partículas de extrema finura resulta em decréscimo da retração plástica autógena em comparação aos valores obtidos no concreto de referência; contudo, provocam o aumento da retração por dessecação superficial. O aumento na retração por dessecação superficial no concreto foi de 66% com sílica ativa e de 38% no concreto com MCAR.

Por outro lado, Caldarone, Grub e Burg (1994) estudando concretos com 5% e 10% de MCAR, não observaram fissuras decorrentes de retração plástica. Os diferentes

^{2.4}ROLS, S.; MBESSA, M.; AMBROISE, J.; PERA, J. Influence of ultra-fine particle on properties of very-high-strength concrete. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES*, 2, 1999. **Proceedings**.... Gramado, Brasil: CANMET/ American Concrete Institute, p. 671-685.

comportamentos obtidos em trabalhos que focalizam esta propriedade, evidenciam a ausência de pesquisas que forneçam informações conclusivas sobre a influência do MCAR no concreto(SOUZA, 2003).

2.6.3 Influências nas propriedades no estado endurecido

Serão consideradas como principais influências no estado endurecido, a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade do concreto.

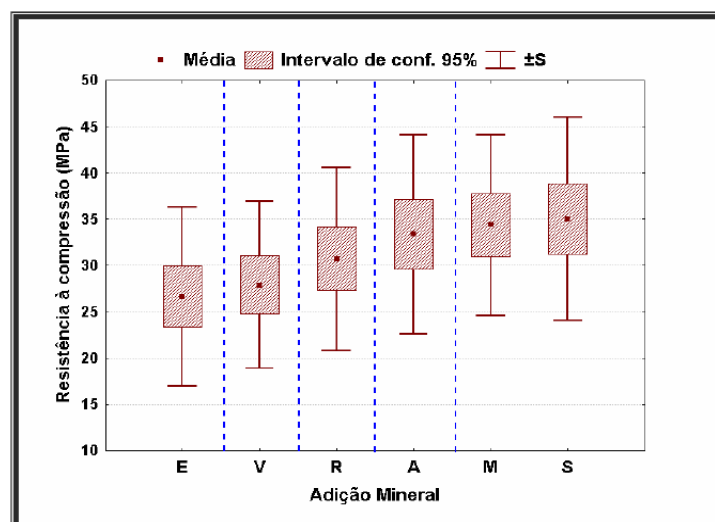
2.6.3.1 Resistência à compressão

A resistência do concreto é a propriedade mais valorizada por projetistas e engenheiros de controle de qualidade. Nos sólidos existe uma relação inversa fundamental entre porosidade e resistência. Conseqüentemente, em materiais multifásicos como o concreto, a porosidade de cada componente da microestrutura pode se tornar um fator limitante para a resistência. Agregados naturais são geralmente densos e fortes, assim, a porosidade da matriz pasta de cimento e da zona de transição na interface entre a matriz e agregado, normalmente determinam a resistência característica do concreto de densidade normal. Embora a relação água/cimento seja importante na determinação tanto da porosidade da matriz quanto da zona de transição na interface e, portanto, na resistência do concreto, fatores como adensamento e condições de cura (grau de hidratação do cimento), mineralogia e dimensão do agregado, tipos de aditivos, adições, condições de umidade e geometria do corpo de prova, tipo de tensão e velocidade de carregamento podem, também, ter efeito importante na resistência. A resistência depende da combinação de vários fatores como propriedades e proporções dos materiais que formam o traço do cimento, o grau de compactação e as condições de cura, porém o fator mais importante é a interação entre a relação água/cimento e porosidade. Vale destacar que essa relação afeta a porosidade da matriz da argamassa de cimento e da zona de transição na interface entre a matriz e o agregado graúdo (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Silva (2010) a adição de algumas pozolanas, como o metacaulim, aumenta de forma muito significativa a resistência à compressão dos concretos em todas as idades, que pode ser explicado pelo refinamento de poros e de grãos e pela melhoria na microestrutura da zona de transição.

Castro (2003) analisou concretos com relação a/ag de 0,40, 0,55 e 0,70 e com vários tipos de adições minerais, com teores de 10% de sílica ativa (S), 10% de cinza de casca de arroz (A), 10% de metacaulim (M), 25% de cinza volante (V), 65% de escória de alto forno (E) e (R) referência (CP II F-32 sem adições), percebendo em sua pesquisa uma redução da resistência à compressão com o aumento da relação a/ag. Também notou que a substituição parcial do cimento levou a um incremento de resistência à compressão, com exceção dos concretos com escória de alto forno (E) e cinza volante (V), com destaque no desempenho dos concretos com sílica ativa (S), metacaulim (M) e cinza da casca de arroz (A), que apresentaram os melhores resultados de resistência à compressão em relação ao concreto de referência (R), conforme demonstrado na Figura 2.7.

Figura 2.7- Estimativa da média global de resistência à compressão em função do tipo de adição (CASTRO, 2003).

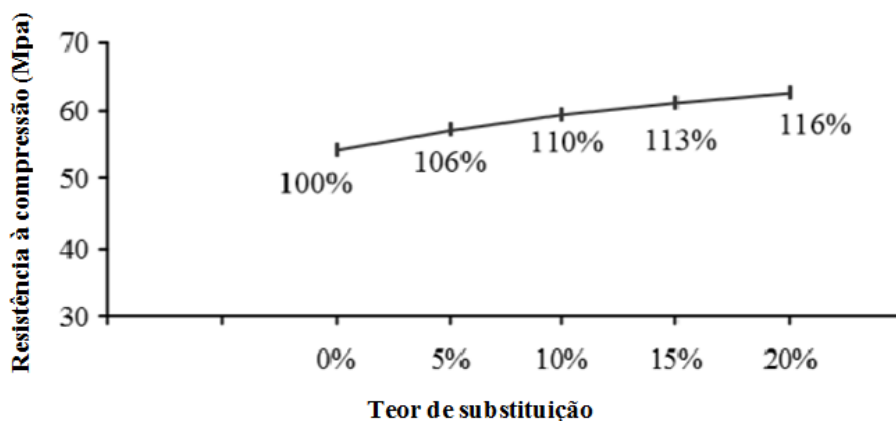


Carmo (2006), em seus estudos, utilizando metacaulim e sílica ativa em substituição ao cimento, verificou que, independentemente do consumo de aglomerantes, dentre os valores analisados, o benefício da utilização de adições minerais contribuiu favoravelmente para a melhoria do nível das resistências mecânicas analisadas. Observou-se pouco ganho de resistência nos concretos com adições até os sete dias de idade, porém tanto para o metacaulim quanto para a sílica ativa, após os vinte e oito dias, essa diferença se tornou mais evidente em relação às dosagens de referência.

Souza (2003), utilizando relações a/ag de 0,25, 0,28, 0,35, 0,46 e 0,60 e níveis de substituição de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, constatou um acréscimo na resistência à compressão aos vinte e oito dias com o aumento da substituição do cimento por

metacaulim como mostrado na Figura 2.8. Nela se tem a contribuição média obtida, dentre as relações a/ag empregadas, onde no eixo horizontal estão colocados os níveis ou teores de substituição e no vertical os valores de resistência à compressão em MPa.

Figura 2.8- Resistência à compressão x teor de substituição aos 28 dias de idade (SOUZA, 2003).



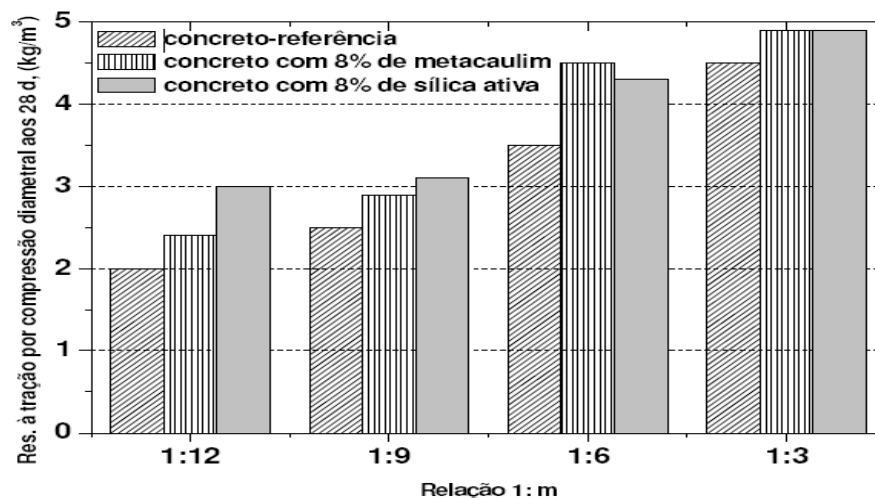
2.6.3.2 Resistência à tração

As adições minerais, por diminuírem a porosidade da matriz e da zona de transição, melhoram também a resistência à compressão e à tração. Isto somente é observado quando ocorrem o consumo e a redução do tamanho dos cristais de Ca(OH)_2 pelas adições minerais, o que acontece em idades mais avançadas (SILVA, 2010).

Carmo (2006), analisando concretos de referência e com 8% de metacaulim e 8% de sílica ativa em substituição ao cimento, constatou nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral um comportamento diretamente proporcional à idade e ao teor de substituição e inversamente proporcional à relação $a/ag^{2.5}$. Observou também o comportamento dos concretos quanto à resistência à tração comparada à relação cimento-materiais secos (1:m) e constatou um acréscimo de resistência para as substituições, conforme mostrado na Figura 2.9.

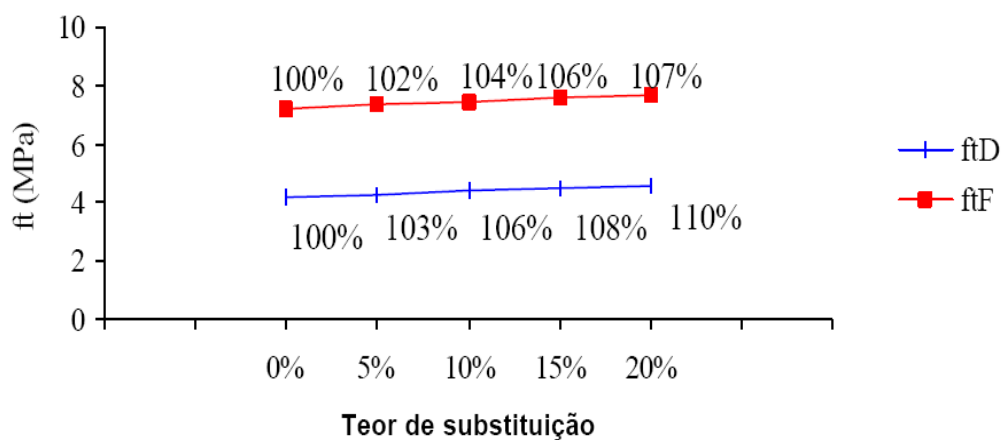
^{2.5} Neste trabalho se empregará o termo água/aglomerante para expressar a relação em massa entre a água e o conjunto de ligantes da mistura, a saber: o cimento e o metacaulim. O termo tem o mesmo significado das expressões “água/materiais cimentícios” ou “água/ligante” utilizada em outros trabalhos, sendo esta última uma expressão de ocorrência até mais atual na literatura científica, dada a rigidez conceitual do cimento e da pozolana como ligantes. Contudo, para manter um padrão com os recentes trabalhos do PPG-GECON, optou-se por manter a terminologia “água/aglomerante”.

Figura 2.9- Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, em função da relação 1: m
(CARMO, 2006).



Souza (2003), em seus estudos, realizou dois diferentes ensaios para a verificação do comportamento da resistência à tração em concretos, sendo o de resistência à tração por compressão diametral (f_tD) e o de resistência à tração na flexão (f_tF). Utilizou relações a/ag de 0,25, 0,28, 0,35, 0,46 e 0,60 e níveis de substituição de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, constatando, nos dois ensaios utilizados, um acréscimo na resistência à tração com o aumento do nível de substituição, conforme mostrado na Figura 2.10, onde se tem a contribuição média obtida, dentre as relações a/ag empregadas aos vinte e oito dias de idade.

Figura 2.10- Resistência à tração na flexão e por compressão diametral em função do teor de substituição aos 28 dias de idade (SOUZA, 2003).



2.6.3.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto, submetido à tensão ou compressão, é dado pela declividade da curva tensão (σ) x deformação (ε) sob carga uniaxial (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Silva (2010), a melhoria da microestrutura da zona de transição na presença de adições minerais não resulta em correspondente aumento do módulo de elasticidade do concreto, que é mais influenciado pelas características do agregado. Com isso, os aumentos nos níveis de resistência à compressão, obtidos com o emprego de adições minerais, não se repetem nos resultados de módulo de elasticidade. Pelo aumento do teor de pasta, o módulo cai na mesma proporção do teor de adição mineral substituindo cimento.

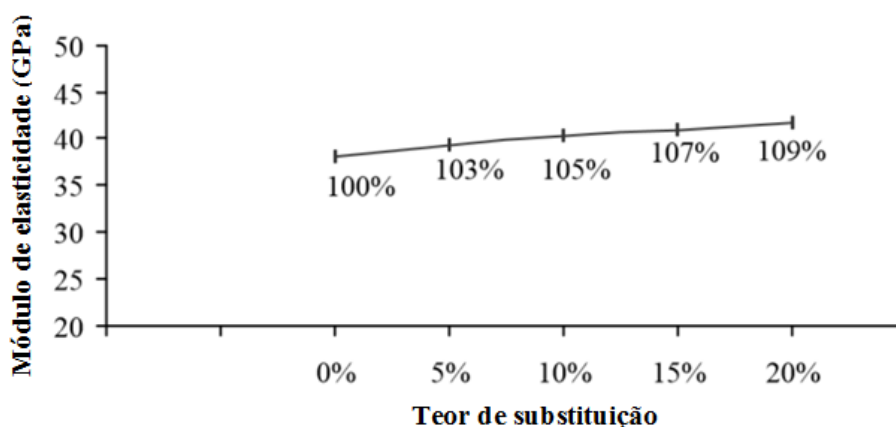
Para Dal Molin (2005), embora estudos comprovem a existência de relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão, os aumentos nos níveis de resistência à compressão obtidos em concretos com adições minerais não se reproduzem com o mesmo grau de intensidade nos valores de módulo de deformação, pois o fator limitante para as causas do seu aumento está relacionado com as características do agregado.

Em seus estudos, Castro (2003) chegou à conclusão de que as adições minerais metacaulinita e sílica ativa originaram os concretos com os melhores índices de desempenho global, no que se refere às propriedades de resistência à compressão, módulo de deformação, absorção de água por imersão e por capilaridade.

Segundo Rocha (2005), o metacaulim, de um modo geral, pode influenciar no aumento do módulo de elasticidade do concreto, quando utilizado como adição suplementar ao cimento Portland e, ainda, de acordo com algumas pesquisas já realizadas, observa-se que este aumento pode chegar a um máximo de 15%.

Souza (2003), utilizando relações a/ag de 0,25, 0,28, 0,35, 0,46 e 0,60 e níveis de substituição de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, verificou em seus estudos, uma melhora no módulo de elasticidade com o aumento do teor de substituição do cimento por metacaulim, como mostrado na Figura 2.11, tendo-se a contribuição média obtida, dentre as relações a/ag empregadas, aos vinte e oito dias de idade, onde no eixo horizontal estão colocados os níveis ou teores de substituição e no vertical os valores do módulo de elasticidade em GPa.

Figura 2.11- Módulo de elasticidade em função do teor de substituição aos 28 dias de idade (SOUZA, 2003).



2.7 DURABILIDADE DO CONCRETO COM METACAU LIM

Antes de abordar a influência do metacaulim na durabilidade do concreto, é importante considerar o conceito de durabilidade segundo alguns importantes organismos nacionais e internacionais ligados ao estudo, à pesquisa e à normatização de produtos cimentícios.

Segundo o *American Concrete Institute* (ACI 201, 1992), a durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como sendo a capacidade deste resistir à ação de intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração. Um concreto será durável se conservar sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto à ação ambiental e uso para o qual foi projetado.

A NBR 6118 (ABNT, 2007) para projeto de estruturas de concreto, com relação às exigências de durabilidade, determina que as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas sob condições ambientais preconizadas em projeto, conservando sua segurança, estabilidade e aptidão de serviço durante o período correspondente à sua vida útil.

A norma de desempenho NBR 15575-2 (ABNT, 2013) trata no item 14 da durabilidade e manutenibilidade, e define que o sistema estrutural deve conservar a segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil (tempo compreendido entre o início de operação ou uso de um produto e o momento em que o seu desempenho deixa de atender às exigências do usuário pré-estabelecidas), e usa como critério, a vida útil de projeto do sistema estrutural, e recomenda que a estrutura principal e

os elementos que fazem parte do sistema estrutural, comprometidos com a segurança e a estabilidade global da edificação, devem ser projetados e construídos de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizados conforme preconizado em projeto e submetidos a intervenções periódicas de manutenção e conservação, segundo instruções contidas no manual de operação, uso e manutenção, devem manter sua capacidade funcional durante toda a vida útil de projeto. A Tabela 14.1, na parte 1, estabelece que para o sistema estrutural do edifício e para cada um dos sistemas que o compõem, a vida útil de projeto (VUP) não seja inferior a 50 anos.

O *Comité Euro-Internacional du Béton* (CEB-FIB 203,1991), em relação à durabilidade das estruturas de concreto, relata que estas devem ser projetadas, construídas e operadas de tal forma que, sob condições ambientais esperadas, mantenham sua segurança, funcionalidade e aparência aceitável, durante um período de tempo, implícito ou explícito, sem requerer altos custos para manutenção e reparo.

2.7.1 Considerações Gerais

No início do desenvolvimento e utilização do concreto armado, as estruturas eram projetadas utilizando principalmente o bom senso e a experiência profissional, sendo a consideração da durabilidade completamente subjetiva. Neste período, a principal característica controlada do concreto era a resistência à compressão, que durante muito tempo foi tida como fonte única e segura das especificações de projeto.

Segundo Possan (2004), com o advento de novas tecnologias, registraram-se grandes avanços na teoria das estruturas e na tecnologia do concreto, que permitiram a construção de edificações cada vez mais esbeltas e econômicas. Com o progresso industrial, o crescimento das cidades, e o conseqüente aumento da poluição urbana, os elementos estruturais passaram a ficar expostos a ambientes extremamente desfavoráveis. E, com o passar dos anos, as estruturas, que eram no início consideradas comotendo longa ou quase infinita vida útil, começaram a apresentar níveis de degradação superior aos desejados, caracterizando o envelhecimento precoce. Essa deterioração foi agravada pela constante mudança no tipo e qualidade dos materiais de construção, e em especial, do cimento. Esta problemática ocasionou uma mudança de paradigma, pois se constatou que as estruturas interagiam com o meio onde estavam inseridas e somente o parâmetro de resistência à compressão era insuficiente para o controle da durabilidade do concreto.

Começou-se, ainda, a entender e a valorizar a importância econômica do problema, como mostram Mehta e Monteiro (2008), onde em países industrialmente desenvolvidos, estima-se que 40% do total dos recursos da indústria de construção sejam destinados ao reparo ou manutenção das estruturas existentes.

Portanto, no cenário atual, para se atingir um adequado parâmetro de durabilidade é insuficiente considerar somente a resistência à compressão das estruturas de concreto. São necessárias ações que busquem, numa visão holística, minimizar a deterioração do concreto, no ambiente a que está exposto e com o qual há uma interação, para se atingir as necessárias condições de uso a que foram propostas.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a experiência prática mostra que, em ordem decrescente de importância, a nível mundial, as principais causas de deterioração das estruturas de concreto são corrosões de armaduras (causadas pela queda do pH do concreto devido à carbonatação, e ou lixiviação e ou ataque por soluções ácidas), exposição aos ciclos de congelamento e degelo, reação álcali-sílica e ataque por sulfato. Em cada uma dessas quatro causas de deterioração do concreto, a permeabilidade e a presença de água implicam em mecanismos de expansão e fissuração. O concreto adequadamente dosado, lançado, adensado e curado é essencialmente impermeável e, assim, deveria ter uma longa vida útil na maioria das condições. Porém, como resultado da exposição ambiental, ocorrem fissuras e microfissuras que se propagam, e quando se interconectam, a estrutura de concreto perde sua estanqueidade e se torna vulnerável a um ou mais processos de deterioração.

Segundo Silva (2010), a redução da porosidade capilar é muito importante para a durabilidade, já que muitos mecanismos de transporte de massa associados à entrada de agentes agressivos no concreto são afetados por essa propriedade. As adições minerais reativas (metacaulim) reagem com o hidróxido de cálcio da hidratação do clínquer e/ou do cimento Portland, gerando silicatos e silico-aluminatos de cálcio hidratado, que precipitam nos poros capilares e reduzem a permeabilidade e a absorção.

2.7.2 Algumas pesquisas realizadas

Em relação à durabilidade dos materiais cimentícios com a utilização do metacaulim, vários estudos já foram realizados, dentre os quais, alguns são apresentados resumidamente na Tabela 2.7 e citados resumidamente na sequência.

Tabela 2.7–Pesquisas realizadas com metacaulim em relação a aspectos de durabilidade.

Autor	Ano	Teor de adição	Aspecto analisado	Relação a/ag	*	Conclusão
Ramlochan, Thomas e Gruber	2000	5%, 10%, 15% e 20%	Reação álcali-agregado	0,42 a 0,45	+	Controle da reação com 10% a 15%
Castro	2003	10%	Carbonatação	0,40 - 0,55 - 0,70	+	Melhor índice de desempenho
Souza	2003	5%, 10%, 15% e 20%	Porosidade total e Ø dos poros	0,25 a 0,60	+	Diminui o Ø médio dos poros e Diminui a porosidade total
Galvão	2004	8%, 10% e 15%	Absorção H ₂ O Pen. íon cloreto Onda ultra-sonica	0,4	+	Argamassas reparo estrutural Penetrabilidade íons cloreto
Batis <i>et al.</i>	2005	10% sub. cim. 20% sub. areia	Resistência à corrosão em argamassas.	-	+	Melhor desempenho: 10% sub. cimento e 20% sub. areia
Al-Akhras	2006	5%, 10% e 15%	Ataque por sulfato	0,50 - 0,60	+	Melhores desempenhos: 10% e 15%
Rossignolo e Oliveira	2006	10%	Absorção H ₂ O Carbonatação	-	+	< Absorção < carbonatação
Oliveira A.	2007	10%, 20% e 30%	Difusão do íon cloreto	0,40 a 0,55	+	Melhor desempenho 10%
Poon, Kou e Lam	2006	5%, 10% e 20%	Difusão de cloretos	0,30 - 0,50	+	Metacaulim + eficiente ~ sílica nas > rel. a/ag e > teor de adição
Oliveira C.	2007	5% e 15%	Porosidade total Absorção H ₂ O	0,35	+	< porosidade e Ø médio dos poros < Absorção H ₂ O por capilaridade e imersão
Tavares	2008	10%	Retração autógena	-	+	< Retração autógena
Figueiredo	2011	10%	Difusão de cloretos	0,60 – 0,68	+	< migração de cloretos
Duan <i>et al.</i>	2012	10%	Carbonatação	0,5	+	< profundidade carbonatada
Medeiros <i>et al.</i>	2013	10%	Difusão de cloretos	-	+	Aumento da vida útil

*conceito (+ ou -) = melhora ou piora nas propriedades analisadas.

Ramlochan, Thomase Gruber (2000) estudaram a expansão devido à reação álcali-sílica, utilizando dois diferentes tipos de agregados reativos. Fizeram a substituição parcial do cimento por metacaulim com os teores de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, em concretos com consumo de 420 kg/m³ de aglomerantes e relação a/ag entre 0,42 e 0,45 e concluíram que a

substituição nos teores entre 10% e 15% de metacaulim foram suficientes para o controle da expansão pela reação álcali-sílica.

Castro (2003), analisando a influência das adições minerais na durabilidade do concreto de cobrimento sujeito à carbonatação com relações a/ag de 0,40, 0,55 e 0,70 e com adições com teores de 10% de sílica ativa, 10% de cinza de casca de arroz, 10% de metacaulim, 25% de cinza volante, 65% de escória de alto forno e concreto sem substituição, concluiu em sua pesquisa, que os concretos com metacaulim e sílica ativa obtiveram os melhores índices de desempenho global nas propriedades mecânicas e na absorção de água por imersão e por capilaridade.

Souza (2003), utilizando concretos com relação a/ag entre 0,25 e 0,60 e com teores de MCAR (metacaulim de alta reatividade obtido do resíduo do beneficiamento do caulim para indústria do papel) com 0%, 5%, 10%, 15% e 20% em substituição ao cimento, constatou, na maioria das amostras estudadas, uma diminuição do diâmetro médio dos poros e da porosidade total com o aumento do teor de MCAR, o que leva a uma maior durabilidade das estruturas de concreto.

Galvão (2004), estudando várias argamassas de reparo estrutural, dentre elas três com a utilização de metacaulim nos teores de 8%, 10% e 15% em substituição parcial do cimento em massa, relação a/ag de 0,40, onde foram avaliadas propriedades associadas à durabilidade (absorção de água por imersão, velocidade da onda ultra-sônica e penetrabilidade de íon cloreto), chegou à conclusão que os resultados com relação aos cloretos foram muito bons e que os melhores resultados gerais foram obtidos por duas argamassas industrializadas seguidas pelas argamassas com metacaulim e sílica ativa.

Batis *et al.* (2005) estudaram o efeito de dois tipos de metacaulim na resistência à corrosão em argamassas, um produzido a partir de caulim grego com baixo teor de caulinita, e outro comercial com alta pureza. Várias proporções foram utilizadas, onde se fez a substituição da areia e ou do cimento por metacaulim. As argamassas foram analisadas considerando os seguintes aspectos: resistência à compressão, perda de massa, potencial de corrosão, medidas eletroquímicas por polarização linear, profundidade de carbonatação e porosidade. Concluíram que as argamassas que tiveram os melhores desempenhos foram as com teor de 10% em substituição ao cimento ou com 20% em substituição à areia; ambas

melhoraram o comportamento quanto à corrosão, enquanto que nos maiores níveis não se verificou a mesma eficiência.

Al-Akhras (2006) investigou o efeito do metacaulim sobre a durabilidade do concreto submetido ao ataque por sulfato, onde foram utilizados níveis de 5%, 10% e 15% em substituição parcial do cimento em massa, relações a/ag de 0,5 e 0,6, cura úmida e em autoclave com períodos de 3, 7 e 28 dias. Com base nos resultados, concluíram que houve aumento na resistência a sulfatos com o aumento do teor de metacaulim e que os concretos com 10% e 15% de substituição, para ambas as relações a/ag, mostraram excelente durabilidade em relação ao ataque por sulfatos.

Rossignolo e Oliveira (2006), estudando o desempenho das propriedades do concreto leve estrutural em relação à sua durabilidade, verificado por meio da análise da absorção de água por imersão e da carbonatação, concluíram que, com a adição de 10% de metacaulim em substituição parcial em massa do cimento, houve aumento expressivo ou melhora de desempenho dessa propriedade.

Munhoz (2007) investigou as reações álcali-sílica e álcali-silicato (reações álcali agregados-RAA) em dois agregados diferentes e potencialmente reativos, utilizando concretos com quatro tipos de adições minerais ativas: a escória de alto forno (15%, 30%, 45% e 60%), a cinza volante (10%, 15%, 20% e 35%), o metacaulim (5%, 10%, 15% e 20%) e a sílica ativa (5%, 10% e 15%) e concluiu que foram necessários no mínimo teores de 10% de sílica ativa e de 15% de metacaulim para mitigar a expansão dos agregados analisados.

Oliveira A.(2007), estudando o desempenho de concretos em relação à ação de íons cloreto, com adições minerais em substituição ao cimento com teores de 10% de sílica ativa, 25% de cinza volante, 10%, 20% e 30% de metacaulim, e com relações a/ag de 0,40 e 0,55, concluiu que as adições promoveram ganhos significativos em todas as propriedades avaliadas e que os concretos com 10% de sílica e com 10% de metacaulim foram os que obtiveram os melhores resultados em relação à penetração de íons cloreto.

Poon, Kou e Lam (2006) estudaram a difusão de cloretos em concretos com dois tipos de adição: metacaulim nas proporções de 5%, 10% e 20%, e sílica ativa nas proporções de 5% e 10%, todos em substituição parcial em massa do cimento, além do concreto de controle (referência) sendo utilizadas relações a/ag de 0,3 e 0,5. Concluíram que para maiores níveis

de substituição e de relação a/ag, o metacaulim é mais eficaz do que a sílica ativa na melhoria da resistência à penetração de íons cloreto. Na Tabela 2.8 estão colocados os valores de carga passante e a classificação dos concretos segundo a ASTM C 1202 (1995), e na Tabela 2.9 estão os resultados de carga passante dos concretos com e sem adição, encontrados na pesquisa.

Tabela 2.8- Penetrabilidade de íons cloreto com base na carga passante (adaptada de ASTM C 1202 (1995)).

Carga passante (Coulombs)	Penetrabilidade de íons cloreto
>4000	Alta
Entre 2000–4000	Moderada
Entre 1000–2000	Baixa
Entre 100–1000	Muito baixa
<100	Desprezível

Tabela 2.9 - Permeabilidade de cloretos em concretos (adaptada de POON; KOU; LAM, 2006).

Séries	Relação a/ag	Mistura	Total de carga passante (Coulombs)			
			3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
1	0,3	Controle	2461	2151	1035	931
		5% MK	1327	1244	862	646
		10% MK	417	347	199	135
		20% MK	406	395	240	124
		5% SF	1060	945	665	426
		10% SF	567	445	360	336
2	0,5	Controle	5312	4054	2971	2789
		5 % MK	4215	3765	2079	1065
		10% MK	1580	1247	918	752
		20% MK	751	740	640	580
		5% SF	3156	2047	1641	1235
		10% SF	3140	1877	1223	1053

MK = metacaulim; SF= sílica ativa; a/ag= água/aglomerante.

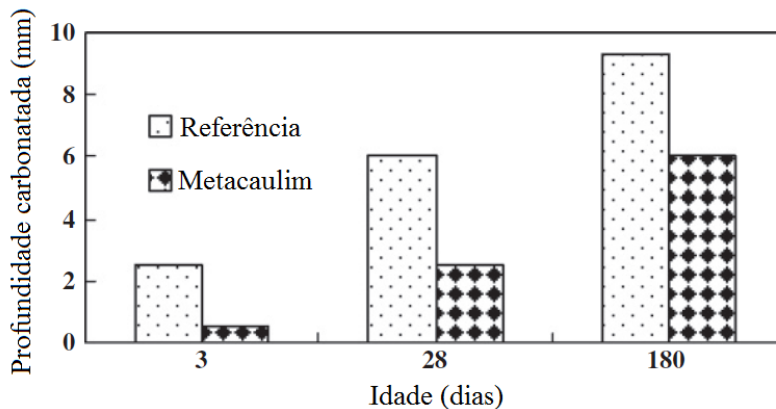
Oliveira C.(2007), utilizando como adição ao concreto o metacaulim com teores de 0%, 5% e 15% em substituição ao cimento e com relação a/ag de 0,35, concluiu que o metacaulim contribuiu com vários aspectos de durabilidade do concreto, pois constatou

uma redução da porosidade e do diâmetro médio dos poros desses concretos, o que proporcionou um refinamento da estrutura dos poros e uma redução na taxa de absorção de água por imersão e por capilaridade.

Tavares (2008), estudando a retração autógena (que pode causar fissuras) de concretos de alto desempenho com adições de escória, metacaulim e sílica ativa, chegou à conclusão que concretos com misturas ternárias (10% de metacaulim, 50% de escória e 40% de cimento) apresentaram a mais baixa retração autógena, ou seja, possibilidade de menor fissuração e maior durabilidade.

Duan *et al.* (2012), investigando a carbonatação em concretos com substituição de parte da massa de cimento por metacaulim no teor de 10%, com relação a/ag de 0,50, verificaram que houve uma redução considerável na porosidade global do sistema, detectada pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, e também, que as profundidades carbonatadas, para o sistema binário cimento-metacaulim, obtiveram reduções significativas no decorrer do tempo, conforme ilustrado na Figura 2.12.

Figura 2.12- Profundidade carbonatada dos concretos (DUAN *et al.*, 2012).



Medeiros *et al.* (2013) estudaram, a partir dos resultados de coeficientes de difusão de cloretos, procedimentos que facilitassem a correlação entre previsão de vida útil de serviço e cobertura do concreto armado. Nesse estudo foram utilizadas adições de metacaulim e de sílica ativa, com teores de 10% em substituição parcial em massa ao cimento. Ficou demonstrado que o metacaulim e a sílica ativa são capazes de reduzir a carga passante no ensaio de migração de cloretos em 76-80% e 85-88%, respectivamente, mostrando a grande eficiência do metacaulim e da sílica ativa para produzir concretos duráveis destinados a regiões altamente influenciadas pela maresia. O método para estimar o aumento da vida

útil, utilizado nesse trabalho, permitiu concluir que o tempo de vida útil de serviço aumentou em 240% para adição do metacaulim e 440% para adição da sílica ativa.

Mendes (2009), utilizando concretos com relação a/ag entre 0,35 e 0,55 e adições de sílica ativa com teor de 10% e de escória com teor de 50%, constatou que as adições minerais empregadas propiciaram uma melhoria no concreto frente aos mecanismos de transporte de massa. O coeficiente de difusão, no ensaio de migração de cloretos, chegou a ser reduzido em 11 vezes para concretos com relação a/ag de 0,55 em relação ao concreto sem adição. Apesar desta pesquisa não ter utilizado o metacaulim, considera-se a sílica ativa com características semelhantes a essa adição.

CAPÍTULO 3

CARBONATAÇÃO

Nesse capítulo é abordado o fenômeno da carbonatação nos concretos e argamassas, onde são colocadas as suas consequências, os fatores intervenientes, o desempenho dos concretos frente à carbonatação e os métodos utilizados para a mensuração e avaliação da frente de carbonatação.

3.1 O FENÔMENO DA CARBONATAÇÃO

A carbonatação é definida como a reação de neutralização da água do poro, saturada de hidróxido de cálcio, e dos compostos alcalinos hidratados, contidos na matriz do concreto, sob a ação do anidrido carbônico que precipitam o carbontato de cálcio (HOUST; WITTMANN, 2002; RILEM, 1988).

Segundo Cascudo e Carasek (2011) o fenômeno da carbonatação consiste na transformação de íons alcalinos (Na^+ , K^+ e Ca^{2+}) em sais de carbonatos desses elementos, pela ação de gases ácidos (SO_2 , H_2S e CO_2), principalmente pelo dióxido de carbono, presentes na atmosfera e que atuam nas superfícies expostas das estruturas de concreto. A ação desses gases ocorre de maneira lenta e diminui gradativamente com o tempo, fato que pode ser explicado pela hidratação crescente do cimento e também pela formação dos produtos da reação de carbonatação que colmatam os poros, localizados próximo à superfície do concreto no início do processo de carbonatação, dificultando cada vez mais o acesso de CO_2 presente no ar para o interior do concreto.

Segundo Pauletti (2009) a carbonatação é um fenômeno físico-químico que ocorre principalmente entre os hidratos do cimento e o CO_2 da atmosfera. Ela reduz a alcalinidade do concreto, fazendo o pH da solução dos poros passar de valores em torno de 14 para valores na faixa de 9. Essa diminuição da alcalinidade pode se tornar crítica para a corrosão da armadura quando determinados fatores são reunidos, como: a presença de água, a diferença de concentração de CO_2 e o acesso do oxigênio, condições normalmente encontradas nas estruturas de concreto armado. A carbonatação, apesar de não ser em si

prejudicial ao concreto, é, segundo Tuutti (1982), um dos principais fenômenos de iniciação do processo de corrosão das armaduras do concreto armado.

Diversos pesquisadores (TUUTTI, 1982; ISAIA, 1995; KAZMIERCZAK, 1995; THIÉRY, 2005) fizeram ampla exposição dos mecanismos e reações envolvidas na carbonatação. 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 expressa segundo a Equação 3.1.



Os mecanismos do processo de carbonatação ocorrem essencialmente de acordo com as seguintes etapas (PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1989; THIÉRY, 2005):

- a) Difusão do CO_2 na fase gasosa e posterior dissolução na água dos poros, formando ácido carbônico conforme mostrado na Equação 3.2;



- b) O ácido carbônico na água se comporta como um diácido fraco e a dissociação ocorre em duas fases como descrito nas Equações 3.3 e 3.4;



- c) A passagem do CO_2 em solução (Equações 3.2 a 3.4) provoca queda da concentração de íons OH^- na solução intersticial dos poros, o que faz o pH diminuir. Para restabelecer a alcalinidade do meio, ocorre a dissolução do Ca(OH)_2 na água dos poros (Equação 3.5) e difusão do Ca(OH)_2 dissolvido das regiões de maior alcalinidade para as de menor alcalinidade;

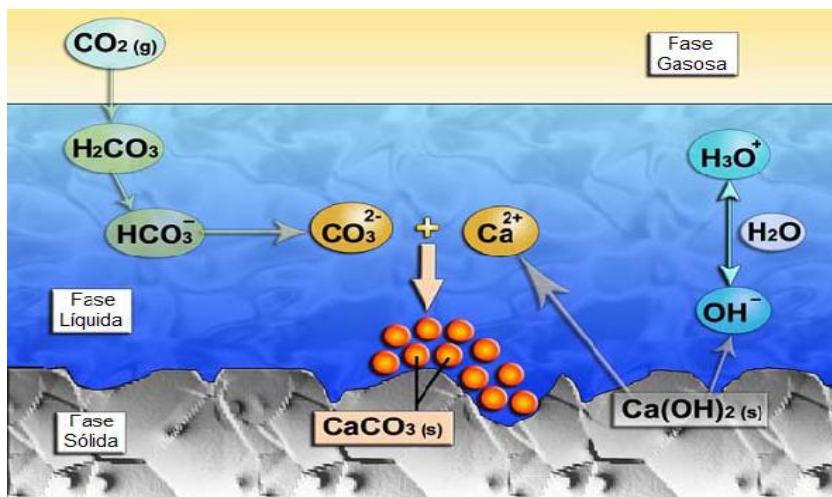


- d) Reação do CO_2 com o Ca(OH)_2 , dissolvidos, e precipitação do carbonato de cálcio (Equação 3.6).



A Figura 3.1 ilustra a intervenção combinada de três fases: gasosa, aquosa e sólida, durante o processo de carbonatação do hidróxido de cálcio.

Figura 3.1- Carbonatação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (THIÉRY, 2005).



No processo descrito anteriormente, tem-se a carbonatação do hidróxido de cálcio, que segundo Possan (2010) é o principal composto carbonatado pelo dióxido de carbono, porém, também são carbonatáveis o hidróxido de potássio (KOH), o hidróxido de sódio (NaOH), os silicatos alcalinos hidratados (C-S-H), as fases aluminato (C-A-H, monossulfato e etringita) e os anidros do cimento (C_2S e C_3S).

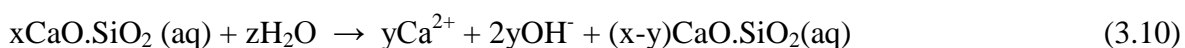
É preciso ter ciência no entanto, que a carbonatação mais relevante é a do hidróxido de cálcio, uma vez que sendo este o mais solúvel dentre os produtos de hidratação do cimento, é ele também o que mais rapidamente reage com o CO_2 . Isto significa que, pelo menos em estágios mais recentes da ocorrência da carbonatação, o carbonato presente é principalmente devido à transformação do hidróxido de cálcio (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Os hidróxidos de sódio e potássio presentes na solução dos poros reagem com o ácido carbônico para formar carbonatos de sódio (Na_2CO_3) e potássio (K_2CO_3), como mostrado nas Equações 3.7 e 3.8, que são solúveis e que se dissociam facilmente, liberando o íon carbonato (Equação 3.9) para, em seguida, reagirem com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formando carbonato de cálcio (CaCO_3) e disponibilizando novamente os hidróxidos de sódio e potássio (HOUST; WITTMANN, 2002).





Sobre a carbonatação dos silicatos de cálcio hidratado, Cascudo e Carasek (2011) afirmam que a carbonatação do C-S-H origina-se com a sua descalcificação, sendo que inicialmente há apenas um decréscimo da relação Ca/Si, tendo-se, posteriormente, a obtenção de uma estrutura altamente porosa, o gel de sílica. A Equação 3.10 apresenta a reação de descalcificação do C-S-H e a formação do gel de sílica.



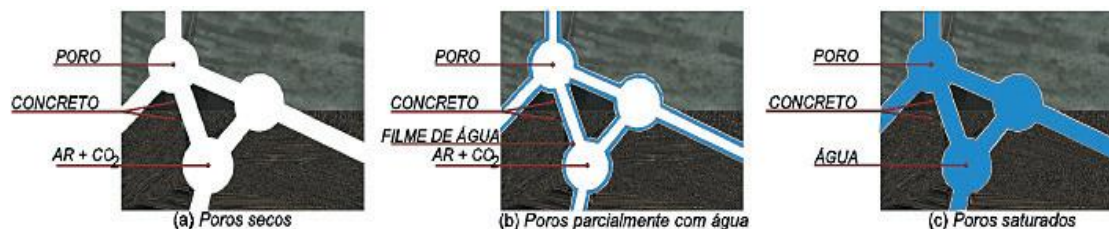
No que diz respeito às fases aluminato, a carbonatação atua de forma análoga ao C-S-H, com formação de calcita e alumina gel. Ressalva se faz, ao monossulfato e à etringita, que além da formação da calcita e alumina gel, formam também o sulfato de cálcio (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Em relação aos compostos C_2S e C_3S , que ficam anidros no cimento, também são passíveis de carbonatação. Peter *et al.* (2008) investigaram, por meio de simulação em concretos expostos ao teor de 50% de CO_2 , a influência de quatro compostos ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, C-S-H, C_2S e C_3S) na carbonatação e constataram que a carbonatação da portlandita é três vezes maior que a do C-S-H, vinte vezes maior do que do C_2S e cinquenta vezes maior do que do C_3S , portanto a carbonatação dos anidros exerce pouca influência no resultado final. Estudos realizados por Hyvert (2009), em argamassas carbonatadas em ambiente natural (0,03% de CO_2) e acelerado (50% de CO_2), mostraram que os anidros não foram carbonatados.

Conforme visto anteriormente, o mecanismo de carbonatação do concreto necessita da presença de água e de anidrido carbônico nos poros. A interação do dióxido de carbono com os compostos hidratados ocorre na solução intersticial e, portanto, a água é fundamental para que as reações químicas de neutralização ocorram (HOUST; WITTMANN, 2002; THIÉRY *et al.*, 2007). O avanço do gás carbônico através da microestrutura do concreto se dá pelo mecanismo de difusão, sendo esta máxima quando os poros estão secos e mínima quando saturados. Na água, a taxa de difusão do dióxido de carbono é de 10^4 a 10^6 vezes mais baixa do que no ar (NEVILLE, 1997). Portanto, a carbonatação do concreto é desprezível nas condições extremas citadas, ou seja, em baixa umidade, a dissolução do CO_2 e dos hidratos é mínima e, em alta umidade (próximo à saturação, devido à condensação de água nos poros), a difusão do dióxido de carbono é

baixa (THIÉRY *et al.*, 2007). Na Figura 3.2 temos uma representação esquemática desses fenômenos.

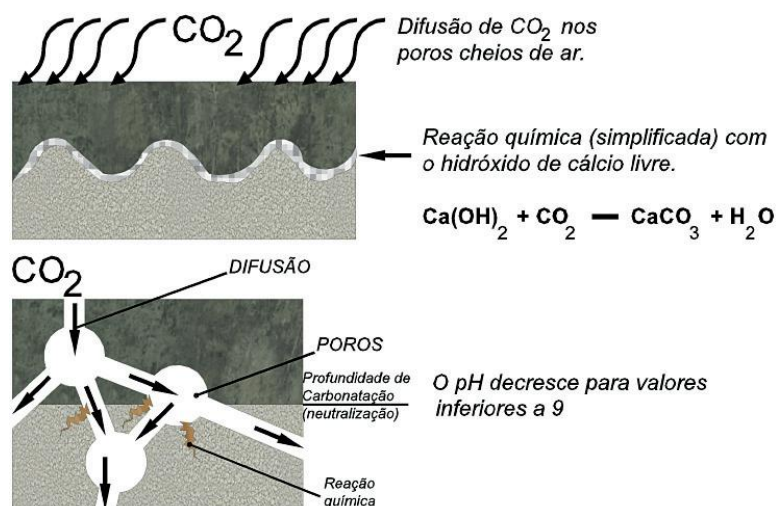
Figura 3.2- Representação esquemática da difusão de CO₂ nas situações de poros secos (a), poros parcialmente preenchidos (b) e poros saturados (c) (BAKKER, 1988).



Pelo fato do concreto ser um material microporoso, a penetração do CO₂ será determinada pela forma da estrutura do poro, e se os poros são preenchidos por água ou não. A condição mais favorável para o avanço das reações de carbonatação é a que apresenta poros interconectados e parcialmente preenchidos com água. Em resumo, para que haja uma carbonatação significativa, a partir da superfície para o interior do concreto, é necessária uma combinação desses fatores (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Segundo Cascudo e Carasek (2011), uma característica do processo de carbonatação é a existência de uma frente de avanço do processo, que separa duas zonas com pH muito diferentes, uma carbonatada com pH em torno de 9 ou menor e outra não carbonatada com pH maior que 12, que é comumente conhecida como frente de carbonatação, como mostra a Figura 3.3, e deve sempre ser mensurada com relação à espessura do concreto de cobertura da armadura.

Figura 3.3- Representação esquemática do processo de carbonatação (CEB, 1984).



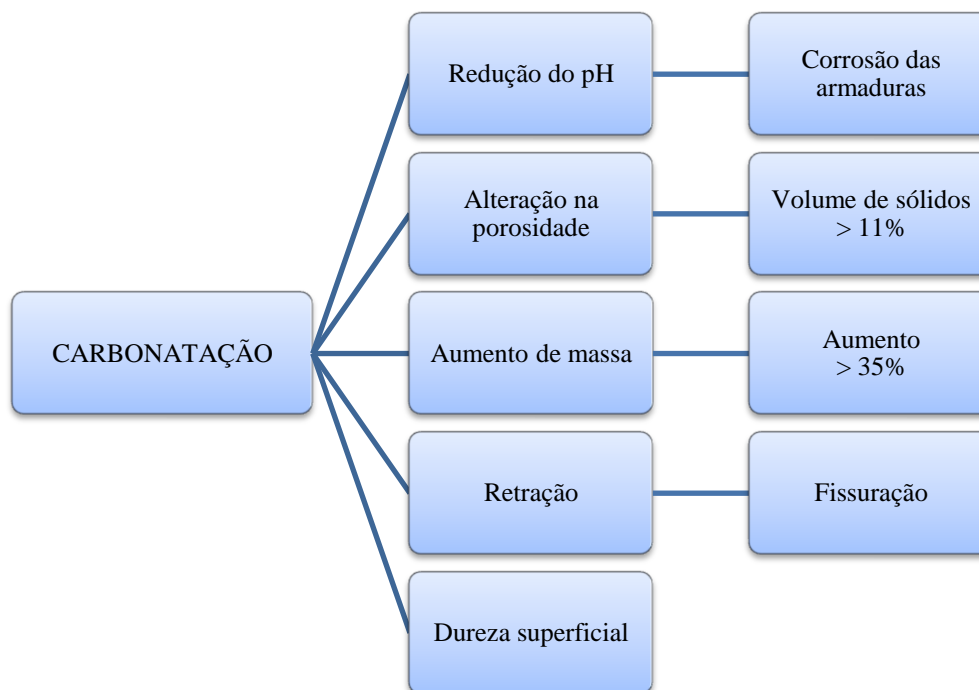
Ainda, em relação ao mecanismo da carbonatação, vale registrar o fato de que no processo pode haver a formação de ácido carbônico. Isto é particularmente verdadeiro para os casos em que o pH da solução do poro, após a ação do CO_2 , resulta num valor suficientemente baixo, igual ou menor a 8,5. Nestas condições, Cascudo e Carasek (2011) concluíram haver uma ausência dos cátions alcalinos na solução do poro, culminando na formação de ácido carbônico (H_2CO_3).

3.2 CONSEQUÊNCIAS DA CARBONATAÇÃO

A carbonatação provoca uma série de alterações na estrutura interna (microestrutura) dos materiais cimentícios, e essas mudanças trazem conseqüências, sendo que, as mais relevantes são a redução do pH, a mudança na porosidade, o aumento de massa e a retração por carbonatação.

Na Figura 3.4 são sistematizadas essas alterações e suas conseqüências, que serão discutidas resumidamente na sequência.

Figura 3.4- Conseqüências mais relevantes da carbonatação no concreto.

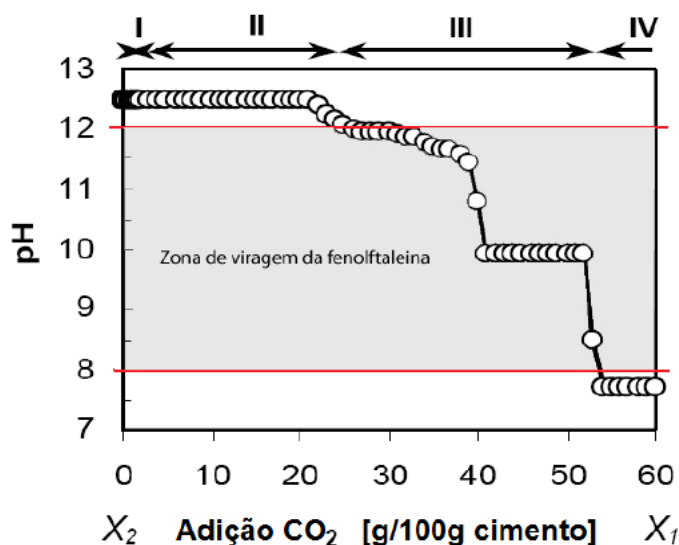


3.2.1 Redução do pH

De modo genérico, o pH de precipitação do CaCO_3 situa-se na faixa de 8,3 a 9,0 à temperatura ambiente. Com o avanço da camada carbonatada até atingir o nível das armaduras, onde o pH passa de aproximadamente 13,0 para 9,0 ou menor, perdem-se as condições termodinâmicas para a estabilidade e manutenção da película passivadora. Portanto, com a carbonatação, descaracterizado o filme de passivação, o aço corrói de forma generalizada, como se estivesse exposto à atmosfera sem qualquer proteção, porém com o agravante de que a umidade permanece no interior do concreto em contato com a armadura por muito mais tempo do que se estivesse exposta ao ar (CASCUDO; CARASEK, 2011). Segundo Tuutti (1982), a carbonatação faz parte da iniciação do fenômeno da corrosão, pois diminui a estabilidade química da capa protetora ou película passivadora do aço.

A Figura 3.5 mostra a evolução da queda do pH feita a partir da simulação termodinâmica realizada por Glasser e Matschei (2007).

Figura 3.5- Redução do pH com o avanço da carbonatação (adaptada de: GLASSER; MATSCHEI, 2007).



Observa-se na Figura 3.5 que não há mudanças significativas na concentração de íons na zona II, o pH é mantido pelo C-S-H ($C/S \sim 1,65$), portlandita, calcita, monocarboaluminato e etringita. No entanto, verifica-se que quando a portlandita é consumida há uma mudança significativa na zona III e o pH é mantido pelo C-S-H. Quando a relação Ca/Si diminui para valores em torno de 0,8, o pH passa de cerca de 12,5 para aproximadamente 9,9. Ao final do processo de carbonatação, o pH atinge valores próximos a 7,5.

3.2.2 Alteração na porosidade

Outra consequência da carbonatação é a alteração da porosidade com o aumento do volume de sólidos. A cristalização ou precipitação dos produtos de carbonatação ocorre nos poros provocando uma redução no volume, na superfície específica e no tamanho médio dos poros. OCaCO_3 possui volume maior que os hidratos responsáveis por sua formação, sendo de aproximadamente 11% maior que o Ca(OH)_2 (LEA, 1970; ISHIDA, MAEKAWA, 2000).

Glasser e Matschei (2007) estimaram um aumento total de sólidos de aproximadamente 18%. Ngala e Page (1997) verificaram que em pastas de cimento Portland comum, depois de carbonatadas, houve uma queda de 10% a 15% na porosidade total e a porosidade capilar foi pouco afetada, enquanto em misturas contendo cinza volante e escória, a porosidade capilar foi aumentada de 140% e 230%, respectivamente. Segundo Cascudo e Carasek (2011), de modo geral, há uma redução da porosidade total na capa de concreto carbonatada, decorrente da precipitação do CaCO_3 , que preenche e colmata os poros.

3.2.3 Aumento de massa

Além das alterações volumétricas, a carbonatação também provoca variação de massa no concreto. Segundo Dias^{3.2} (2000 *apud* CASCUDO; CARASEK, 2011) para cada mol de Ca(OH)_2 que se transforma em CaCO_3 ocorre um ganho de massa de 35%, implicando em aumento de massa da região carbonatada. Esse acréscimo de massa é esperado, pois há incorporação de CO_2 na estrutura interna do concreto, quando Ca(OH)_2 se converte em CaCO_3 .

3.2.4 Retração

Segundo Cascudo e Carasek (2011), a retração por carbonatação existe e é causada por dois mecanismos básicos: perda de moléculas de água na reação principal de carbonatação; diminuição de volume na pasta de cimento endurecida, com a dissolução do Ca(OH)_2 em zonas onde ele está sob tensão e a precipitação do CaCO_3 em espaços não sujeitos à tensão. Esses dois mecanismos implicam em redução volumétrica da massa de concreto, como se

^{3.2} DIAS, W. P. S. Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1255-61, 2000.

ocorresse uma redistribuição e reorganização dos espaços na pasta de cimento endurecida. A retração por carbonatação aumenta a parcela de retração irreversível e pode contribuir para a fissuração generalizada da superfície exposta do concreto, mas, na prática, ela não é um fenômeno significativo para os concretos, já que apenas uma capa superficial é que efetivamente carbonata, representando uma porção relativamente pequena do volume total do concreto.

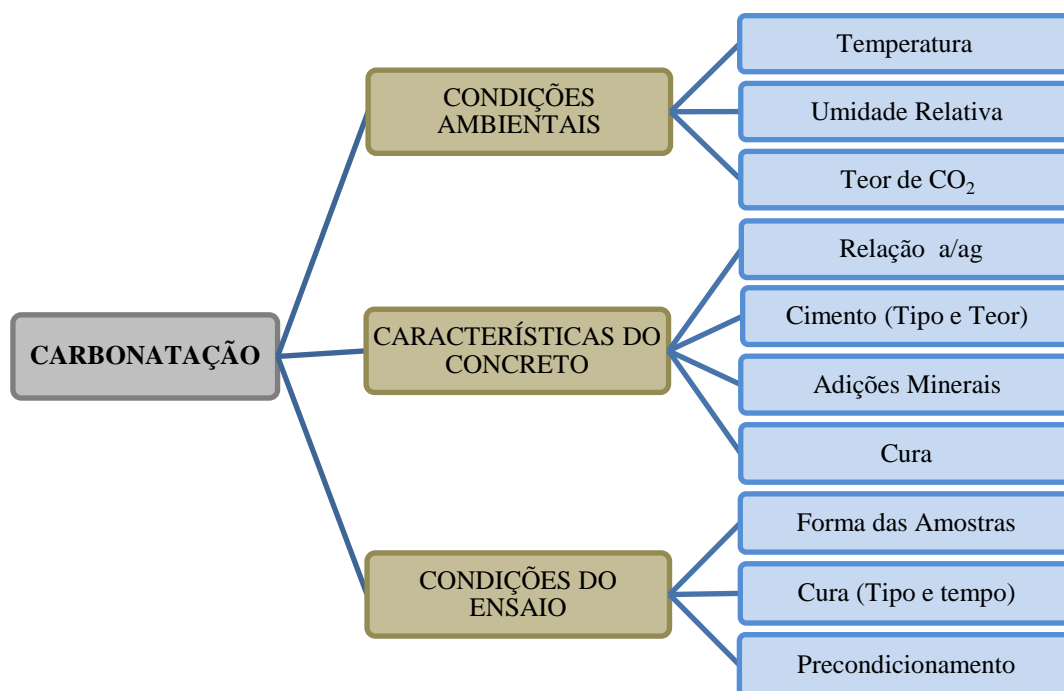
3.2.5 Aumento na dureza superficial

É importante ressaltar também que, com a carbonatação, há um aumento na dureza superficial do concreto, o que reforça a tese de que pastas de cimento que contenham mais carbonatos precipitados e menos hidróxido de cálcio são, de fato, mais duras. Neville (1997) comenta que a água liberada pela reação de carbonatação pode ajudar na hidratação do cimento, o que resultaria em maior dureza superficial, menor permeabilidade superficial e menor movimentação de umidade.

3.3 FATORES QUE INTERFEREM NA CARBONATAÇÃO

Tendo em vista a carbonatação processar-se por meio de um mecanismo de difusão, a profundidade e a velocidade de carbonatação dependem de vários fatores, basicamente vinculados ao sistema de poros e ao pH do concreto, e vinculados também às condições adequadas para a difusão do CO₂, dadas essencialmente pelas características do ambiente no qual a estrutura se insere. Na Figura 3.6 há uma sistematização desses principais fatores intervenientes que serão discutidos resumidamente na sequência.

Figura 3.6- Fatores que influenciam a carbonatação.



3.3.1 Condições ambientais

As condições ambientais exercem influência considerável no processo da carbonatação, dentre as principais podemos citar a temperatura, a umidade relativa, o teor de CO₂, que são descritas de maneira sucinta a seguir.

3.3.1.1 Temperatura

A temperatura é uma variável que age como catalisadora das reações químicas, em que se verifica, de maneira geral, um aumento das velocidades de reações na medida em que as temperaturas aumentam. Tuutti (1982) considera a temperatura importante, uma vez que aumenta a mobilidade das espécies iônicas em solução, facilitando o transporte de massa no concreto, o que favorece a ocorrência de reações químicas mais rapidamente. Em relação à velocidade de carbonatação, as variações de temperatura entre 20°C e 45°C não exercem influência significativa, pois as reações ainda são controladas pela difusão (PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1991).

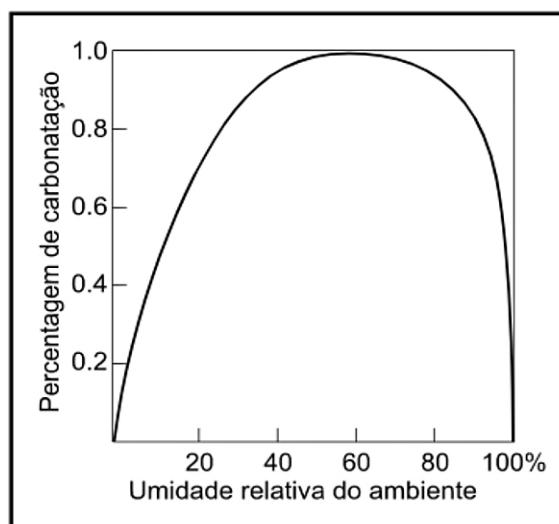
3.3.1.2 Umidade relativa

Segundo Papadakis, Vayenas e Fardis (1989), a água possui duplo papel na carbonatação: ela pode bloquear os poros, dificultando a difusão do CO_2 , e também é o meio onde ocorre a reação entre o CO_2 e o $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Pauletti (2009), que fez uma ampla revisão de trabalhos sobre o tema, chegou à conclusão de que não há consenso na literatura sobre um valor de umidade relativa ótima para as reações de carbonatação, mas sim de um intervalo, compreendido entre 40% e 85%. Como exemplo, ela citou alguns pesquisadores que expressaram valores de umidade ideais para a carbonatação: ACI (1991) comitê 222, 50%, Andrade (1992) entre 50% e 80%, Helene (1986) entre 65% e 85%, Neville (1997) entre 50% e 70%, Papadakis, Vayenas e Fardis (1989) entre 50% e 65%, Saetta, Schrefler e Vitaliani (1995) entre 40% e 80%, Wolf e Dal Molin (1989), 70%.

Os trabalhos de Wolf e Dal Molin (1989), Papadakis, Vayenas e Fardis (1991), Roy, Poh e Northwood (1999), Gervais, Garrabrants e Sanchez, (2004) contemplam ensaios de carbonatação com diferentes umidades relativas. A taxa de carbonatação máxima é observada em umidades intermediárias entre 60% a 70%.

Esses resultados são coerentes com os apresentados por Cascudo (1977), na Figura 3.7, onde se verifica a variação da carbonatação com a alteração da umidade relativa do ambiente, ressaltando uma faixa máxima de percentagem carbonatada para umidades relativas entre 50% e 70%.

Figura 3.7- Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente (CASCUDO, 1977).



3.3.1.3 Teor de CO_2

Este é um dos fatores ambientais que exerce uma influência significativa no processo de carbonatação do concreto. À medida que a concentração de CO_2 no ar é mais elevada, o fenômeno é mais pronunciado. Em ambientes naturais cuja concentração de CO_2 seja mais alta, conforme os citados por Neville (1997) na Tabela 3.1, serão produzidos maiores gradientes de concentração de CO_2 (diferença de concentração de CO_2 entre o meio externo e o interior do concreto), fazendo com que as taxas de difusão desse gás no concreto sejam maiores e, conseqüentemente, um processo de carbonatação mais intenso e rápido. Segundo Neville (1997), essas concentrações podem variar de acordo com o ambiente, chegando a até 33 vezes superiores quando se comparam os ambientes urbano-industrial e rural, conforme é mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Concentração do CO_2 no ar em relação a alguns tipos de ambientes (NEVILLE, 1997).

Concentração de CO_2 no ar (em volume)	Tipo de Ambiente
0,03%	Ambiente rural
0,10%	Ambiente de laboratório (não ventilado)
0,30%	Ambiente urbano
1,00%	Ambiente urbano-industrial

Em relação aos ensaios de carbonatação natural com exposição de teores de CO_2 atmosféricos, devido ao longo tempo de espera para se obter resposta, têm sido empregados pela comunidade científica, ensaios acelerados com concentrações de CO_2 entre 1% e 100%. Entretanto, esse teor ainda gera dúvidas e não se pode dizer que exista um teor ótimo ou ideal para os ensaios acelerados de carbonatação.

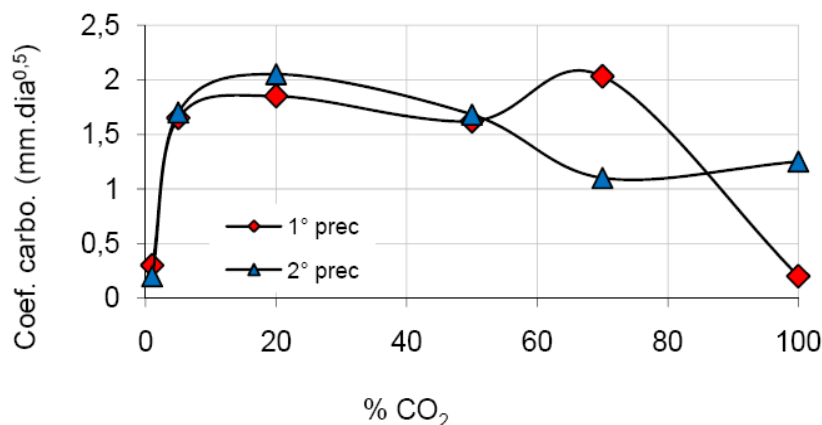
Algumas pesquisas contemplaram diferentes concentrações de dióxido de carbono no ensaio de carbonatação que são apresentadas a seguir.

Uomoto e Takada (1993), utilizando concentrações de CO_2 de 0,07%, 1% e 10%, concluíram que para as relações água/cimento estudadas, o aumento do teor de CO_2 elevou a velocidade de carbonatação dos concretos.

Rougeau (1997) utilizou-se de dois tipos de condicionamento, quais sejam, RILEM TC 116-PCD e sala climatizada, e concentrações de CO_2 de 1%, 5%, 20%, 50%, 70% e 100% e teve como resultados os apresentados na Figura 3.8, onde nota-se que, independente do tipo de condicionamento, o coeficiente de carbonatação aumenta até a

concentração de 20%, sendo que o incremento mais substancial ocorre até o percentual de 5% de CO₂.

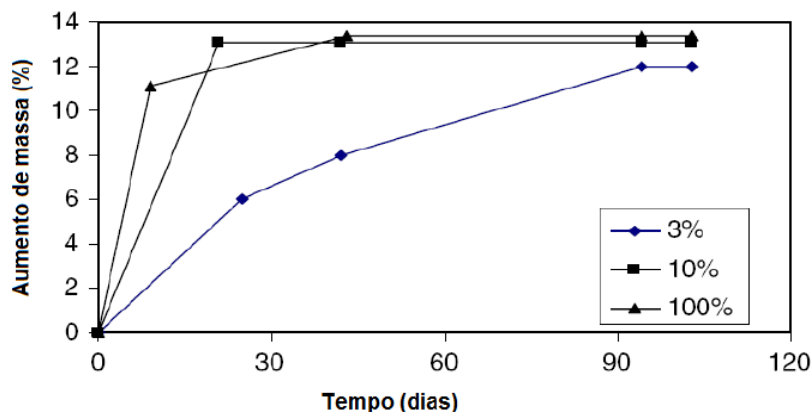
Figura 3.8- Influência da concentração de CO₂ nos coeficientes de carbonatação (baseada em ROUGEAU, 1997).



Abreu (2004) e Pauletti (2004) mediram profundidades de carbonatação inferiores para teores de CO₂ próximos à saturação, quando comparados com os resultados obtidos a 5% e 6% de CO₂, respectivamente.

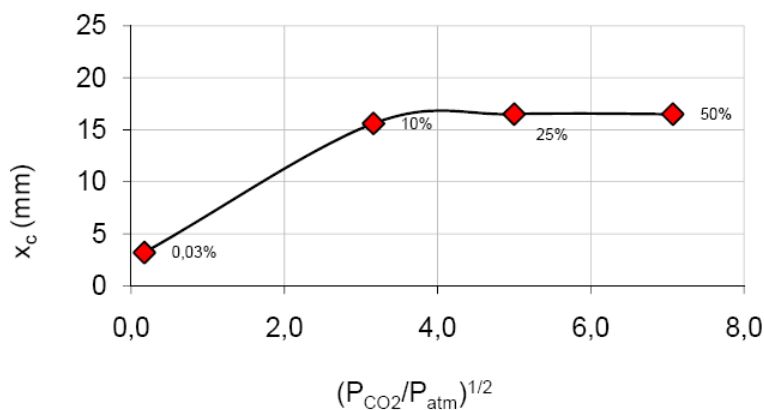
Pastas de cimento Portland comum foram ensaiadas por Castellote *et al.* (2009) em ambiente com umidade de equilíbrio de 65%, temperatura de 22°C e concentrações de CO₂ de 0,03% (natural) e 3%, 10% e 100% (acelerado), onde a carbonatação foi acompanhada pelo ganho de massa, sendo os resultados apresentados na Figura 3.9. Verifica-se que o ganho de massa final é praticamente o mesmo para as concentrações de 10% e 100% de CO₂ e aos 103 dias a massa das três amostras estava estabilizada ou aumentava muito lentamente. Na curva de 100%, a estabilização está entre 7 e 40 dias, na de 10% entre 0 e 20 dias e com 3% entre 48 e 98 dias, aproximadamente.

Figura 3.9- Aumento na massa de amostras submetidas à carbonatação acelerada (baseada em CASTELLOTE *et al.*, 2009).



Na pesquisa realizada por Hyvert (2009), amostras de argamassa foram ensaiadas com umidade de equilíbrio de 65%, temperatura de 22°C e com teores de 0,03%, 10%, 25% e 50% de CO₂. A Figura 3.10 apresenta os resultados de profundidade carbonatada (X_c) em relação à concentração de CO₂ obtidos após 211 dias de ensaio, usando cimento Portland comum (CP I).

Figura 3 10- Profundidades carbonatadas de argamassas em diferentes concentrações de CO₂(baseada em HYVERT, 2009).



Pode-se notar que a profundidade de carbonatação aumenta consideravelmente até a concentração de 10% de CO₂. A partir desse valor, o incremento é mínimo, sendo que entre 25% e 50% não há diferença. Praticamente as mesmas tendências foram observadas pelo autor para os cimentos Portland composto (com 6% e 20% de fíler calcário) e Portland com escória de alto forno.

Pauletti (2009) estudou o comportamento de argamassas submetidas à carbonatação acelerada e natural fazendo uma correlação entre elas. Para esse estudo utilizou-se das

seguintes condições: dois tipos de cimento (CP I-S e tipo CP IV), três relações água/cimento (0,40, 0,55 e 0,70), dois tempos de cura (7 e 28 dias), dois tipos de acondicionamento (em sala climatizada e conforme recomendações da RILEM) e, dois percentuais de dióxido de carbono (6% e 100% de CO₂). Concluiu-se que a concentração de 100% de CO₂ não deve ser utilizada, pois altera a cinética do processo de carbonatação e diminui a velocidade do ensaio.

Os estudos citados indicam que o incremento na profundidade de carbonatação ocorre até determinada concentração, girando em torno de 10% de CO₂, isto porque a carbonatação é dificultada ou impedida de avançar devido a uma obstrução dos poros com água e carbonatos, ambos gerados pelas reações de carbonatação e contribuindo para a desaceleração da reação.

3.3.2 Características do concreto

Segundo Cascudo e Carasek (2011), as características do concreto ligadas à sua porosidade são determinantes no que tange à capacidade de proteção desse concreto contra agentes agressivos, sendo elas decisivas na definição da maior ou menor facilidade com que o CO₂ se transporta em direção ao interior do material. Dessa maneira, aspectos da dosagem e composição do concreto como a relação água/cimento, o tipo e o teor de cimento e as adições minerais, entre outros, são alguns dos fatores que influenciam fortemente o sistema de poros, bem como a “reserva alcalina”, que é dada pela quantidade de hidróxido de cálcio disponível nos poros da pasta de cimento. A seguir, são apresentados e discutidos alguns dos principais aspectos ligados à composição e à dosagem do concreto, que interferem na sua capacidade de proteção contra carbonatação.

3.3.2.1 Relação água/aglomerante (a/ag)

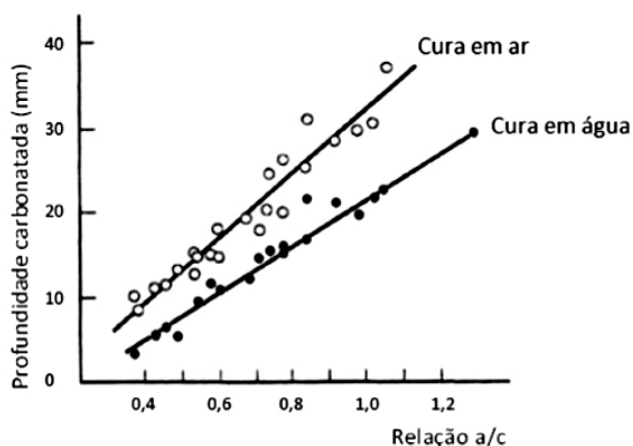
A variável a/ag apresenta uma relação diretamente proporcional à profundidade de carbonatação, ou seja, quanto maior for a relação a/ag empregada no traço de concreto, maior será a profundidade de neutralização do mesmo, em uma mesma idade de ensaio acelerado (HOPPE, 2008). A relação água/cimento influencia significativamente a porosidade do concreto (quantidade, dimensões e conectividade dos poros) e, portanto, a facilidade ou não de penetração do CO₂.

Em pastas de cimento, quando a relação a/c aumenta de 0,4 para 0,8, o volume de poros cresce cerca de cinco vezes (METHA; MONTEIRO, 2008) e o coeficiente de difusão do CO_2 aumenta mais de dez vezes (HOUST; WITMANN, 1994).

Segundo Kulakowski (2002) a carbonatação é fortemente influenciada pela porosidade dos materiais e as profundidades de carbonatação são maiores nas maiores relações a/ag, principalmente nas acima de 0,45 a 0,50.

Estudos têm mostrado relações aproximadamente lineares entre a profundidade carbonatada e a relação a/c, como o feito por Pina (2009) ilustrado na Figura 3.11. Afirmção válida somente para concretos concebidos com os mesmos materiais.

Figura 3.11- Influência da relação a/c e da condição de cura na profundidade carbonatada do concreto (PINA, 2009).



Observa-se que o aumento na relação a/ag leva a acréscimos nas profundidades carbonatadas. O fato deve-se ao aumento da porosidade, diminuição da tortuosidade, aumento da interconectividade da rede de poros do concreto e, conseqüentemente, da permeabilidade do material, que fica mais susceptível à difusão do CO_2 atmosférico.

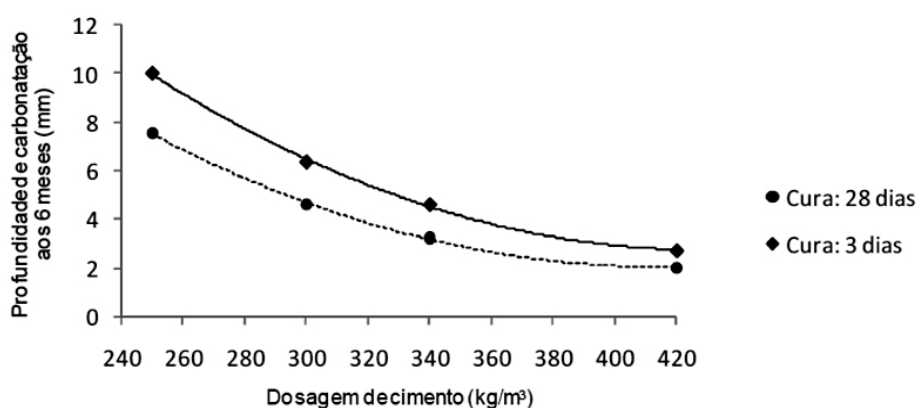
De acordo com Castro (2003), a estrutura física da pasta de cimento exerce uma grande influência sobre a carbonatação do concreto. Quanto maior for a interconectividade entre eles, maior será a facilidade de difusão do CO_2 e, conseqüentemente, maior será a velocidade da reação de carbonatação. A porosidade da pasta apresenta relação direta com a relação a/ag. Dessa forma, quando a relação a/ag apresenta um incremento, a porosidade da pasta aumenta, ocasionando uma maior permeabilidade, e maior facilidade de difusão do

CO₂ através da rede de poros do concreto, levando a um aumento da profundidade carbonatada em um mesmo intervalo de período de ensaio.

3.3.2.2 Consumo de cimento no concreto

Quanto maior o teor de cimento na composição do concreto menor a velocidade de carbonatação, conforme mostrado na Figura 3.12, uma vez que a quantidade de hidróxido de cálcio disponível na solução dos poros do concreto é proporcional ao teor de clínquer existente no proporcionamento da mistura.

Figura 3.12- Relação entre o teor de cimento e a profundidade carbonatada (CASCUDO; CARASEK, 2011).



À medida que se tem maior quantidade de Ca(OH)₂ na pasta, a frente de carbonatação avança mais lentamente para o interior do concreto, sendo esse um aspecto positivo do teor de cimento. O mecanismo que explica esse comportamento se baseia no fato de que a frente de carbonatação reduz o pH do meio. Com essa redução, o Ca(OH)₂ precipitado atua como uma reserva de alcalinidade, liberando íons OH⁻, de maneira que, pelo menos em parte e temporariamente, haverá um resgate da alcalinidade perdida. Evidentemente que teores excessivos de cimento podem gerar retração e fissuração da pasta, o que, por outro lado, pode favorecer a entrada de CO₂.

3.3.2.3 Adições minerais

O emprego das adições minerais no concreto pode originar dois efeitos opostos em relação à carbonatação, descritos a seguir.

Efeito negativo: redução da “reserva alcalina”. Devido às reações pozolânicas, ocorre uma redução da quantidade de Ca(OH)₂ precipitado na pasta de cimento, o que significa haver,

em geral, uma redução da capacidade de proteção da pasta de cimento quanto ao avanço da frente de carbonatação.

Efeito positivo: alteração física da pasta de cimento, por efeito fíler (físico) e pozolânico (químico), produzindo com isso um sistema de poros refinado, menos conectado e com maior grau de tortuosidade, muitas vezes caracterizado por um menor volume total de poros, o que implica em redução da difusividade do CO_2 na matriz cimentícia e, conseqüentemente, um retardo no avanço da carbonatação. Particularmente, são as adições minerais muito finas, essencialmente silicosas e de natureza pozolânica, que produzem os melhores resultados em termos dessa alteração positiva da pasta.

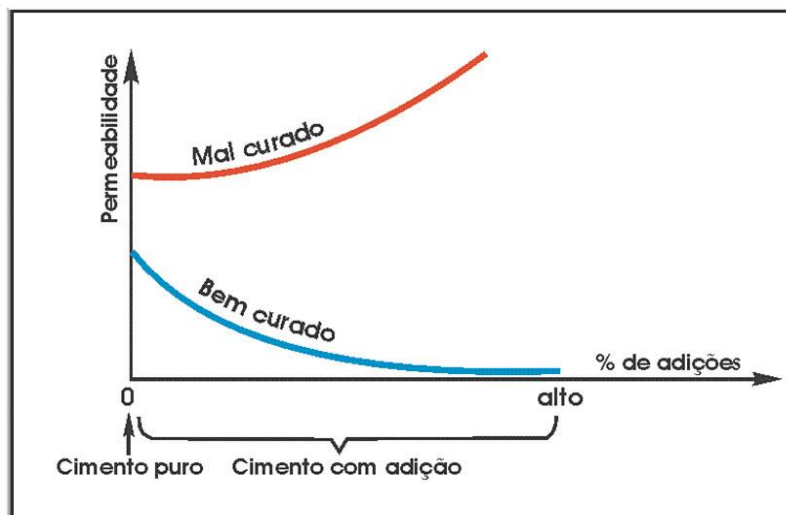
É necessário, portanto, saber qual desses dois efeitos será preponderante na utilização de uma determinada adição mineral no concreto, no que se refere à susceptibilidade à carbonatação, e isso depende do tipo de adição, do teor de adição, da relação a/ag e também da eficiência da cura úmida efetuada. Geralmente quanto maior o teor de adição utilizado, maior a profundidade carbonatada, fato que é explicado pela queda da reserva alcalina mediante a redução do teor de cimento. Entretanto, para concretos contendo adições minerais dentro de uma faixa mais baixa de relação a/ag (menor que 0,45 - 0,50), o efeito predominante é o da melhoria qualitativa do sistema de poros, não havendo aumento da carbonatação.

Para combater o efeito prejudicial das adições, quando se emprega altos teores de adição mineral ao concreto, vem sendo estudada, desde a década de 80, a incorporação de cal hidratada ao concreto. A ideia é repor a alcalinidade do sistema pelo aumento do teor de hidróxido de cálcio, visando a redução da velocidade de avanço da frente de carbonatação. O teor utilizado de cal hidratada geralmente oscila em torno de 20% (CADORE, 2008). As pesquisas nacionais sobre esse tema são lideradas pelo grupo de estudos de concretos da Universidade Federal de Santa Maria-RS e tem mostrado que a incorporação de cal hidratada no concreto com altos teores de adição mineral, garante a redução da profundidade carbonatada.

Em geral, concretos com adições minerais necessitam mais de cura úmida do que concretos sem adições, principalmente as com menor finura (mais grossas), como a escória de alto forno e a cinza volante. A Figura 3.13, proposta pelo *Comité Euro-Internacional du Béton-CEB* (1993), ilustra de forma qualitativa esse efeito, destacando que para essas adições, o

maior percentual utilizado no concreto somente trará contribuições em termos de redução da permeabilidade, caso os dois processos (adição e procedimento de cura eficaz) estejam atrelados.

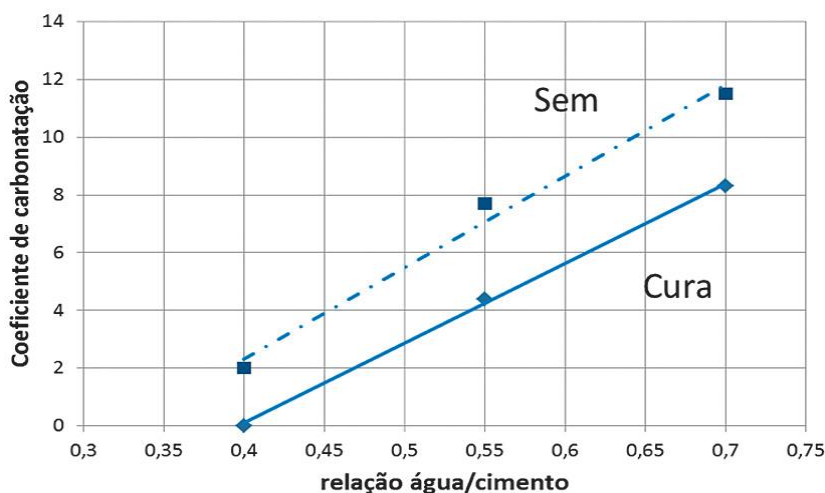
Figura 3.13- Influência do teor de adições e da cura úmida na permeabilidade do concreto (CEB, 1993).



3.3.2.4 Condições de cura

Esse é um aspecto de grande relevância no que se refere à melhoria da pasta de cimento, notadamente na região do concreto de cobrimento e quando as condições climáticas indicarem baixas umidades relativas do ar, altas temperaturas e ação do vento sobre a estrutura. Um adequado procedimento de cura impede a rápida evaporação da água de amassamento do concreto nas primeiras idades, evitando ou minimizando o fenômeno da retração plástica no concreto, evitando com isso, possíveis fissuras decorrentes desse fenômeno. A cura também proporciona um aumento do grau de hidratação da pasta de cimento na superfície do concreto, com a consequente diminuição de sua porosidade, e portanto, criando uma capa superficial no concreto relativamente compacta e bem consolidada. Como a carbonatação é um fenômeno que se dá de fora para dentro, mediante a difusão de CO_2 , a realização de uma cura efetiva passa a ser uma ferramenta importante na garantia da durabilidade da estrutura quanto à carbonatação. A Figura 3.14 ressalta a influência da cura na carbonatação, onde se vê uma evolução linear crescente dos coeficientes de carbonatação com o aumento da relação água/cimento.

Figura 3.14- Influência da cura e da relação água/cimento na carbonatação do concreto obtida por procedimento acelerado, em concretos com cimento CP II F-32 (CASCUDO; CARASEK, 2011).



3.3.3 Condições do ensaio

Pelo fato de que a carbonatação natural ser um processo lento e que demandaria muitos tempo para se chegar a resultados representativos, torna-se necessário a introdução de ensaios acelerados com condições mais severas e apropriadas para que a carbonatação aconteça mais rapidamente. Porém o processo traz algumas dificuldades como a de se estabelecer uma correlação entre a carbonatação acelerada e a natural, já que existem muitas variáveis a serem consideradas, principalmente em relação as características do concreto e as condições ambientais a que será exposto, além do que, uma aceleração do processo pode levar a formação de produtos diferentes daqueles formados no processo natural, dentre outros.

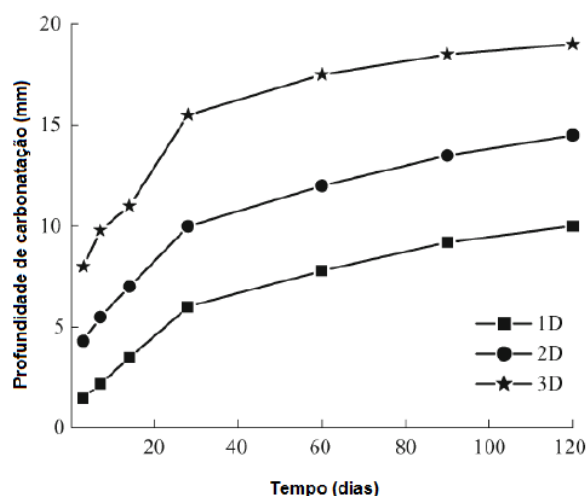
As condições de ensaio, apesar de não estarem diretamente ligadas ao processo de carbonatação natural que acontece nas estruturas de concreto em serviço, são determinantes para a avaliação da carbonatação, pois interfere significativamente na frente de carbonatação, ou seja, na profundidade carbonatada. Dentre elas, consideramos a forma das amostras, o processo de cura e o condicionamento.

3.3.3.1 Forma das amostras

A forma das amostras (cilíndrica ou prismática) para a frente de carbonatação já foi discutida por alguns pesquisadores e seus efeitos já são conhecidos, sendo as formas cilíndricas mais utilizadas do que as prismáticas. A maioria dos estudos de carbonatação tem a preocupação de evitar a soma de vetores na difusão de CO_2 , selando algumas superfícies dos corpos de prova para que o dióxido de carbono penetre apenas em uma

direção. A soma de vetores na frente de carbonatação, ou seja, a entrada do CO_2 em uma, duas ou três direções (1D, 2D, 3D, respectivamente) foi avaliada por Chen *et al.*^{3.5} (2008 *apud* PAULETTI, 2009) e alguns resultados são apresentados na Figura 3.15, onde se verifica perfis semelhantes de avanço de carbonatação, porém com diferentes valores atingidos pelas três modalidades, sendo a profundidade atingida em 3D cerca de 30% maior que a 2D e esta, por sua vez, é cerca de 45% maior que a alcançada em 1D.

Figura 3.15- Profundidade de carbonatação em concretos com difusão de CO_2 em uma (1D), duas (2D) e três direções (3D) (adaptada de CHEN *et al.*, 2008 *apud* PAULETTI, 2009).



3.3.3.2 Cura

Como dito anteriormente, as condições e o tempo de cura têm importância fundamental na formação da microestrutura do concreto, e por consequência na profundidade de carbonatação. Essas condições se tornam ainda mais impactantes em concretos com adições pozolânicas, já que as reações pozolânicas acontecem mais significativamente nas maiores idades do concreto, e também, se a exposição ao CO_2 ocorrer em pequenas idades a carbonatação será muito maior, gerando distorções nos resultados

Para se determinar o tipo e o tempo de cura para ensaios de carbonatação normal e acelerada, Pauletti (2009) fez uma revisão da literatura e chegou à conclusão que a cura submersa ou úmida propicia as melhores condições para hidratação do cimento e consequente fechamento dos poros. A cura submersa tem a vantagem de ser mais fácil de

^{3.5} CHEN, S.; SUN, W.; ZHANG, Y.; GUO, F. Carbonation depth prediction of fly ash concrete subjected to 2-and 3-dimensional CO_2 attack. **Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China**, v. 2, n. 4, p. 395-400, 2008.

realizar, uma vez que não exige nenhum tipo de equipamento e os custos são mais baixos, além do que, evita a carbonatação em pequenas idades. Nesse caso, para a cura submersa, a água deve ser saturada com cal, para não ocorrer lixiviação das espécies químicas mais solúveis, como o hidróxido de cálcio.

3.3.3.3 Precondicionamento

Também conhecido como sazonalidade, compreende a etapa entre a cura das amostras e o início do ensaio de carbonatação acelerada, onde os corposdeprova são submetidos à ação do CO₂. Segundo Pauletti (2009) esta etapa é um ponto crítico e não pode ser ignorada ou negligenciada, pois as diferentes formas ou mesmo a falta do condicionamento podem resultar em diversas profundidades de carbonatação para um mesmo material, uma vez que as condições de umidade interna iniciais do material interferem na cinética das reações de carbonatação.

No Brasil ainda não existem normas relativas aos ensaios de carbonatação. Estas estão sendo elaborados pela comissão de estudo da Associação Brasileira de Normas Técnicas vinculada ao Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (CB-18), a CE 18:300.06: Durabilidade do Concreto, textos para a determinação de profundidade de carbonatação, incluindo para os ensaios acelerados o condicionamento.

O procedimento de condicionamento mais conhecido é o TC 116-PCD da *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et des Recherches sur les Matériaux et les Constructions* (RILEM, 1999), que propicia conhecer o estado hídrico de cada amostra antes do ensaio de carbonatação, além da padronização necessária.

A RILEM (1999), nas recomendações TC 116-PCD descreve os procedimentos para ensaios de permeabilidade do concreto como critério da sua durabilidade. Nessas recomendações, a parte “A” especifica o condicionamento de corposdeprova de concreto para medição da permeabilidade a gases e absorção capilar de água. O procedimento é indicado para quaisquer ensaios que requeiram distribuição uniforme de umidade do material a ser ensaiado.

Essas recomendações seguem quatro etapas, descritas a seguir:

- a) Primeira etapa - Determinação da concentração de umidade de equilíbrio

Para cada série de testes, a concentração de umidade de equilíbrio do concreto com a atmosfera de $(75 \pm 2)\%$ de umidade relativa a $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ deve ser determinado a partir de uma experiência de dessorção, que é a liberação da água através da superfície das amostras de concreto ou argamassa.

Nesta etapa, primeiro determina-se a quantidade total de água evaporável (W_e). Para isso, ao final de cada período de cura, uma amostra de cada formato de corpo de prova e composição do material a ser ensaiado é seca em estufa a 105°C , até que a diferença de massa observada seja menor que 0,5 g entre duas leituras consecutivas, num intervalo de 24 horas. O cálculo da quantidade total de água evaporável (W_e) é dado pela Equação 3.8:

$$W_e = m_o - m_d \quad (3.8)$$

Onde:

W_e = teor total de água evaporável (g);

m_o = massa da amostra no final de cura (g);

m_d = massa da amostra após secagem em estufa (g).

Em seguida, pode-se calcular a concentração de umidade evaporável “we” pela relação entre o teor total de água evaporável “ W_e ” e a massa da amostra seca “ m_d ” (Equação 3.9):

$$w_e = W_e / m_d \quad (3.9)$$

Em segundo lugar, é feita a determinação da concentração intermediária de equilíbrio da umidade. Através de um ensaio de dessorção, ao final da cura, uma segunda amostra é cortada em fatias de ± 5 mm ou triturada de forma a se obter pedaços de diâmetro equivalentes, e é colocada em câmara climática com circulação de ar e sem dióxido de carbono, com umidade de $(75 \pm 2)\%$ e temperatura de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Para este teste de dessorção, deve ser usada uma quantidade mínima de 500 g do material. O material permanece em secagem até o equilíbrio de umidade com o ambiente controlado. Deve-se tomar cuidado para que não se perca parte do material durante as pesagens. Após o equilíbrio, o material é pesado e colocado em estufa a 105°C até a constância de massa, com diferença de 0,1 g entre duas leituras consecutivas em um intervalo de 24 horas. A quantidade de água evaporável no equilíbrio ($W_{e,75}$) é calculada pela Equação 3.10:

$$W_{e,75} = m_{e,75} - m_{d,75} \quad (3.10)$$

Onde:

$W_{e,75}$ = conteúdo de água de equilíbrio em $(75 \pm 2)\%$ de umidade relativa do ar (g);

$m_{e,75}$ = massa de concreto em equilíbrio com $(75 \pm 2)\%$ de umidade relativa do ar (g);

$m_{d,75}$ = massa seca de concreto (g).

Então, calcula-se a concentração da umidade de equilíbrio ($w_{e,75}$) pela Equação 3.11:

$$w_{e,75} = W_{e,75} / m_{d,75} \quad (3.11)$$

onde:

$w_{e,75}$ = concentração da umidade de equilíbrio.

b) Segunda etapa - Determinação da perda de massa necessária durante a pressecagem

A perda de massa necessária durante a pressecagem é calculada em função da massa original do corpo de prova, ao final da cura, pela Equação 3.12:

$$\Delta m = \left(\frac{w_e - w_{e,75}}{1 + w_e} \right) m_o \quad (3.12)$$

Onde:

Δm = perda de massa (g);

w_e = concentração da umidade evaporável;

$w_{e,75}$ = concentração da umidade de equilíbrio;

m_o = massa do corpo-de-prova ao final da cura (g).

c) Terceira etapa - Pressecagem

A secagem das amostras a serem ensaiadas é acelerada a uma temperatura de 50°C em câmara ventilada, onde as amostras permanecem até perderem a massa especificada na etapa anterior. A fim de impedir a formação de gradientes radiais de umidade, as faces de fundo e superior das amostras de concreto de teste são seladas e impermeabilizadas. A circulação de ar livre nas superfícies expostas das amostras de concreto deve ser assegurada.

A pressecagem segue até que a perda de água requerida seja alcançada com precisão de 5%, conforme a Equação 3.13:

$$\frac{\Delta m_{obs} - \Delta m_{cal}}{\Delta m_{cal}} < 0,05 \quad (3.13)$$

Δm_{obs} = variação de massa observada durante o experimento (g);

Δm_{cal} = variação de massa exigida, de acordo com a Equação 3.12 (g).

Durante o processo de secagem, a perda de peso das amostras deve ser monitorada por repetidas pesagens em curtos intervalos de tempo. Para as misturas comuns de concreto, o tempo de secagem necessário depende da difusividade do vapor de água do concreto e pode variar aproximadamente entre várias horas a duas semanas.

d) Quarta etapa - Fase de redistribuição da umidade

Após a pressecagem, as amostras são seladas ou estocadas em pequenos recipientes mantidos na temperatura de 50°C, não podendo haver troca de umidade com o ambiente. Essa temperatura favorece a distribuição do gradiente de umidade axial no sentido de uma distribuição uniforme. Esta fase de distribuição deve ter uma duração mínima de 14 dias.

Passada essa fase, as amostras seladas devem ser levadas para o ambiente onde os ensaios de carbonatação serão realizados, com pelo menos 24 horas de antecedência. Este procedimento garante que a temperatura da amostra se equilibre com a do ambiente.

Vários pesquisadores utilizaram o procedimento da RILEM (VENQUIARUTO, 2002; STUMPP; SPERB, 2003; PAULETTI, 2004; DALLA LANA, 2005; HOPPE FILHO; CADORE; HOPPE, 2008; PAULETTI, 2009), sendo que entre os citados o único que discutiu dois tipos de condicionamento foi Pauletti (2009) que apesar de considerar alguns pontos negativos no procedimento da RILEM, ressalta a vantagem deste procedimento, que permite conhecer com precisão o estado hídrico do material no tempo $t=0$, principalmente se os resultados forem utilizados em modelos preditivos.

3.4 DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ADIÇÕES QUANTO À CARBONATAÇÃO

Sobre a durabilidade dos concretos e pastas de cimento, com adições minerais, em relação à carbonatação, vários estudos foram desenvolvidos, dentre eles alguns são apresentados na Tabela 3.2 e resumidamente citados na sequência.

Tabela 3.2-Pesquisas realizadas com adições minerais em relação à carbonatação.

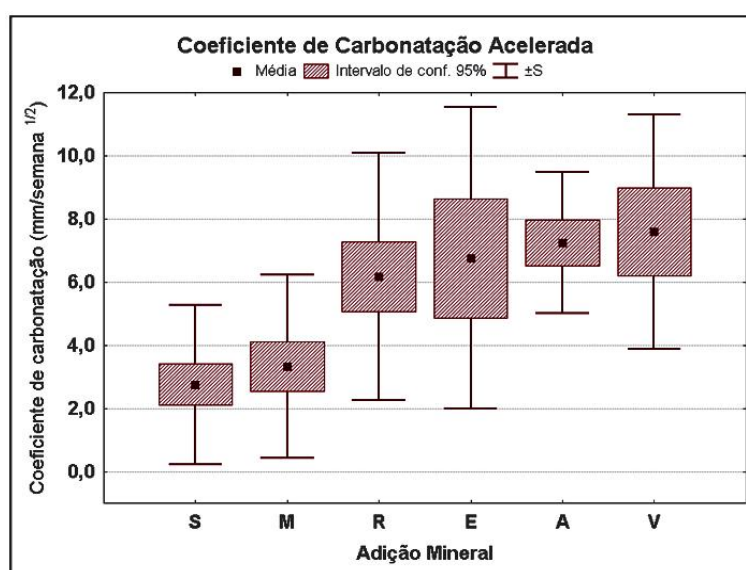
Autor	Ano	Adição		Relação a/ag	Conceito / Conclusão	
		Tipo	Teor		(+ ou -) = melhora ou piora as propriedades.	
Kulakowski	2002	SA	5%, 10%, 15% e 20%	0,30 a 0,80	-	Menor desempenho Para a/ag > 0,45/0,50.
Castro	2003	SA - M - CCA CV - EAF	10% 25% - 65%	0,40 - 0,55 - 0,70	+	Melhor desempenho para M, SA, e CCA.
Sperb	2003	EAF - CV - CCA	vários	0,35 - 0,50 - 0,65	- +	Menor desempenho em todas Melhor em 20% CCA e 1% K ₂ SO ₄ .
Stumpp	2003	EAF - CV - CCA e Cal	vários	0,35 - 0,45 - 0,65	-	Menor desempenho k melhorou c/ adição Cal.
Abreu	2004	CV	15%, 30% e 45%	0,44 - 0,48 - 0,50 - 0,65	-	Menor desempenho nas > rel. a/ag e nos > teores de substituição.
Possan	2004	SA	5%, 10%, 15% e 20%	0,30 - 0,45 - 0,60 - 0,80	-	Menor desempenho forte influência da a/ag > 0,45.
Vaghetti	2005	CCA CV - EAF	25% 25% e 50% -70%	0,50 - 0,60 e 0,70	-	Menor desempenho nas a/ag ≥ 0,50 e nas resistências ≤ 40 MPa.
Dalla Lana	2005	CV e Cal	50%	-	-	Menor desempenho p/ 50% adição = k > 100% p/ 50% adição + cal = k > 20%.
Barin	2008	EAF + ativ. EAF	50% 70%	0,30 - 0,42 - 0,55	-	Menor desempenho > prof. Carbonatada.
Hoppe Filho	2008	CV e Cal	50%	-	-	Menor desempenho > prof. Carbonatada.
Cadore	2008	EAF + CV + CP e Cal	70% + 20% + 10%	-	-	Menor desempenho > prof. Carbonatada.
Mendes	2009	SA EAF	10% 50%	0,35 - 0,45 - 0,55	-	Menor desempenho após carbonatado = >abs. capilar e < permeab. superficial.
Martinelli Júnior	2010	CCA-nat. CCA-moí	15% e 25% 15% e 25%	0,45 - 0,55 - 0,65	-	Menor desempenho geral > desempenho com adição de 15% de CCA-natural.
Duan <i>et al.</i>	2012	M	10%	0,5	+	Melhor desempenho < prof. Carbonatada.

*SA=sílica ativa; M=metacaulim; CCA=cinza casca de arroz; CV=cinza volante; EAF=escória de alto forno

Kulakowski (2002), que em seus estudos utilizou concretos com relações a/ag entre 0,30 e 0,80, com substituição parcial do cimento por sílica ativa nos teores de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, e comparando dados de resistência à compressão e de carbonatação, concluiu que o conceito difundido no meio técnico de que concretos com maior resistência à compressão apresentam menores profundidades de carbonatação ou maior durabilidade, não se confirmou. Quando os concretos passam a conter adições pozolânicas, no caso a sílica ativa, a resistência à compressão não é garantia de resistência à carbonatação.

Castro (2003), utilizando a/ag de 0,40, 0,55 e 0,70 e com adições com teores de 10% de sílica ativa (S), 10% de cinza de casca de arroz (A), 10% de metacaulim (M), 25% de cinza volante (V), 65% de escória de alto forno (E) e (R) referência (CP II F-32 sem adições), concluiu em sua pesquisa, que as adições minerais (principalmente o metacaulim e a sílica ativa) nem sempre causam prejuízo de desempenho no que se refere à carbonatação; ao contrário, elas proporcionam ganhos de desempenho aos concretos. Na Figura 3.16é mostrado o efeito das adições minerais no coeficiente de carbonatação.

Figura 3.16- Média global dos coeficientes de carbonatação acelerada, de diferentes concretos (de mesma faixa de relação a/agl), agrupados por tipo de adição mineral empregada, obs.: cura ao ar (CASTRO, 2003).



Sperb (2003), analisando a influência de ativadores químicos na resistência à compressão e na carbonatação de concretos com relações a/ag de 0,35, 0,50, e 0,65 e utilizando compostos com adições binárias e ternárias de escória de alto forno, cinza volante e cinza da casca de arroz, constatou aumento nos coeficientes médios de carbonatação para todas as misturas, com exceção, nos concretos com 20% de cinza de casca de arroz e 1% de K_2SO_4 como ativador, em substituição ao cimento.

Stumpp (2003), verificando o efeito da adição de cal hidratada sobre a carbonatação de concretos com altos teores de adições minerais de cinza volante, cinza da casca de arroz e escória de alto forno, em misturas binárias e ternárias, observou que há uma diminuição nos coeficientes de carbonatação com a adição de cal hidratada, e as misturas que obtiveram os melhores desempenhos frente à carbonatação foram as de referência e as com escória. As condições dos ensaios foram: cinco misturas, com e sem cal hidratada, com

teores de substituição de adições variando entre 50% e 90% em massa do cimento, e de cal entre 15% e 18% sobre a massa do aglomerante, totalizando 33 misturas analisadas; relação a/ag de 0,35, 0,45 e 0,65; carbonatação acelerada com parâmetros controlados (5% de teor de CO₂, 75% de umidade relativa e 20°C de temperatura) com exposição de até 12 semanas em câmara condicionada.

Abreu (2004), estudando a corrosão de armadura induzida por carbonatação em concretos utilizando para essa pesquisa cinza volante nos teores de 0%, 15%, 30% e 45% em substituição parcial ao cimento CP IV-32; relações a/ag de 0,44, 0,48, 0,50 e 0,65; cura por 28 dias; sazonalidade por 28 dias; carbonatação acelerada em até 223 dias com teores de CO₂ de 5% e >50%; concluiu que é significativo o efeito da relação a/ag e o teor de adição para a profundidade carbonatada, ou seja, as profundidades cresceram com o aumento das relações a/ag e com o teor de cinza volante, sendo que, somente nos concretos com 45% de cinza volante se obteve comportamentos similares ao de referência.

Possan (2004), investigando a carbonatação do concreto em ambientes natural e acelerado, com adição de sílica ativa nos teores de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, relações a/ag de 0,30, 0,35, 0,45, 0,60 e 0,80, chegou à conclusão que a carbonatação é fortemente influenciada pela relação a/ag da mistura, sendo que, acima de 0,45 a profundidade de carbonatação tende a se elevar com o aumento da relação a/ag e do teor de sílica ativa.

Vagheti (2005), avaliando o desempenho dos concretos com e sem adições minerais frente à corrosão do aço induzida por carbonatação acelerada e utilizando nessa pesquisa: relações a/ag de 0,50, 0,60 e 0,70; cinco tipos de mistura com teores de 0% de adição, 25% e 50% de cinza volante, 25% de cinza da casca de arroz, 70% de escória de alto forno, todos em substituição em massa ao cimento CP V-ARI; cura por 49 dias em câmara úmida; condicionamento e teor de 10% de CO₂ com ciclos de molhagem e secagem; concluiu que os concretos com relações a/ag $\geq 0,50$ e resistências ≤ 40 MPa, não apresentaram desempenhos adequados no tocante à corrosão do aço induzida por carbonatação.

Dalla Lana (2005), analisando a camada de cobrimento de concretos com adição de cinza volante no teor de 50% com e sem adição de cal hidratada, curados em condições ambientais e submetidos a ensaio de carbonatação acelerada com exposição ao CO₂ por até 12 semanas, concluiu que o coeficiente de carbonatação aumentou, em média, em 100% para concretos com 50% de adição sem cal e em 20% para concretos com adição da cal.

Barin (2008), verificando o desempenho de diferentes misturas de concretos produzidos com cimento Portland branco com altos teores de escória de alto forno, com e sem o ativador químico sulfato de sódio, frente à carbonatação e utilizando as seguintes condições: adição com teor de 0%, 50%, sem e com ativador químico no teor de 4%, e de 70%; relação a/ag de 0,30, 0,42 e 0,55; ensaio de carbonatação acelerada com teor de 2% de CO₂, temperatura de (23±1)°C e umidade relativa de (75±2)%; concluiu que a profundidade carbonatada aumentou com o aumento do teor de escória, com a utilização do ativador químico, e também com o aumento da relação a/ag.

Hoppe Filho (2008), estudando a adição de cal hidratada em concretos com adição pozolânica como forma de reduzir a susceptibilidade à carbonatação, utilizou teores de 0% e 50% de cinza volante em substituição ao cimento, sem e com 20% de cal hidratada; chegou à conclusão que a adição de cal hidratada não foi eficiente em reduzir a susceptibilidade à carbonatação acelerada e que a profundidade carbonatada aumentou com a adição de cinza volante.

Cadore (2008), investigando a carbonatação da camada de cobertura estrutural do concreto e utilizando as seguintes condições: misturas ternárias com 70% de escória de alto forno, 20% de cinza volante e 10% de cimento CP V-ARI com e sem adição de cal hidratada em substituição em massa da areia; mistura de referência com 100% de cimento CP V-ARI; cura em ambiente natural por 91 e 300 dias; ensaio de carbonatação acelerada, após condicionamento, com teor de CO₂ de 5% com até 12 semanas de exposição, chegou a resultados que indicaram um acréscimo da profundidade carbonatada com o uso das adições e com o acréscimo da cal hidratada, e também, uma tendência de maiores coeficientes de carbonatação nas camadas mais externas com o uso da cal.

Mendes (2009), avaliando as propriedades de transporte de massa em concretos com adições e utilizando relação a/ag de 0,35, 0,45 e 0,55 e com teores de adição de 10% de sílica ativa e 50% de escória de alto forno, observou que em concretos carbonatados, a absorção por capilaridade aumenta devido ao estreitamento dos poros da superfície, o que aumenta a força capilar e reduz a permeabilidade superficial do concreto devido à colmatação dos poros dificultando assim, a passagem dos gases da superfície para o interior do material.

Martinelli Junior (2010), analisando a carbonatação natural de protótipos de concretos com a cinza da casca de arroz natural e moída, nos teores de 0%, 15% e 25% em substituição ao cimento, para relações a/ag de 0,45, 0,55 e 0,65, com avaliação dos protótipos nas idades de 18, 24 e 30 meses, chegou a resultados que mostraram coeficientes de carbonatação maiores para os concretos com adições e que é possível substituir em até 15% de cimento por cinza da casca de arroz natural, sem perdas significativas de resistência e de durabilidade no que tange à carbonatação.

3.5 MÉTODOS UTILIZADOS NA PESQUISA PARA AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE CARBONATADA

Kazmierczake Zara (1996) discutem os principais métodos utilizados para a determinação da profundidade de carbonatação, entre eles estão: a aspersão de indicadores químicos de pH, variação de massa, microscopia óptica, análise térmica diferencial e termogravimétrica, difração de raios X, espectrofotometria com infravermelho e determinação do pH da amostra.

Segundo Cascudo e Carasek (2011), o procedimento mais conhecido é a aplicação de um indicador de pH que fornece, de forma simples e prática, a profundidade carbonatada tanto em laboratório como em obra. Além dos métodos citados anteriormente, destacam-se ainda, a densimetria por radiação gama, radiografia de nêutrons, análise por infravermelho da emissão de CO₂ após a decomposição térmica dos carbonatos e análise de isótopos estáveis de carbono e oxigênio.

Apesar da possibilidade de se obter informações que identifiquem produtos ou compostos formados pela reação de carbonatação na maioria dos métodos utilizados nesta pesquisa, somente com a técnica com indicadores de pH é que efetivamente se consegue mensurar a profundidade carbonatada nos corpos de prova.

A seguir são apresentados os métodos utilizados nesta pesquisa.

3.5.1 Indicadores de pH

Indicadores de pH ou indicadores de neutralização são substâncias que mudam de cor conforme a concentração de íon hidrogênio na solução. A principal característica dos indicadores é a mudança gradual de cor em um pequeno intervalo de pH, denominado de zona de viragem do indicador ou intervalo de mudança de cor. Existem vários indicadores que variam tanto na cor como na zona de viragem, por isso torna-se fundamental a escolha mais adequada para cada tipo de estudo. No caso da carbonatação do concreto, o indicador mais utilizado é a fenolftaleína, podendo também serem utilizados os indicadores timolftaleína e amarelo de alizarina. A técnica consiste na aspersão do indicador na região recém fraturada do concreto, realizada antes que a face exposta pela fratura venha a se carbonatar ao reagir com o CO₂ do ar. O contato da solução com o concreto irá evidenciar a diferença das regiões carbonatadas e não carbonatadas pela coloração típica do indicador utilizado, sendo que na região não carbonatada ficará evidente a coloração do indicador (pH do concreto próximo a 13), e nas regiões carbonatadas resultará aspecto incolor (pH do concreto próximo a 8). Realizam-se então, as mensurações das frentes de carbonatação com observações visuais das áreas carbonatadas, utilizando-se um equipamento de precisão (paquímetro digital).

3.5.2 Microscopia eletrônica de varredura

O microscópio eletrônico de varredura é um equipamento que permite a obtenção de informações estruturais e químicas de amostras, alcançando aumentos de até 900 000 vezes, porém, para a obtenção de uma boa imagem, o aumento é da ordem de 10 000 vezes. As vantagens de se utilizar esta técnica estão na facilidade de preparação das amostras, na alta resolução e na profundidade de foco (imagem tridimensional) e na possibilidade de combinar a análise microestrutural com a microanálise química.

As imagens são formadas a partir da incidência de um feixe fino de elétrons de alta energia na superfície da amostra, sob condição de vácuo. Do choque com a amostra, parte do feixe é refletido e coletado por detectores que convertem o sinal em imagem de elétrons retroespalhados, ou de elétrons secundários, ocorrendo também a emissão de raios X. As imagens de elétrons retroespalhados são representadas em tons de cinza, contudo, a resolução é menor que a de elétrons secundários, pois abrange uma maior área na superfície analisada. As imagens por elétrons secundários são de maior resolução e com

grande profundidade de campo, permitindo observar a morfologia dos cristais através do aspecto tridimensional da amostra analisada.

Além das imagens obtidas, é possível obter informações qualitativas e semiquantitativas da composição da amostra na região submicrométrica de incidência do feixe de elétrons por meio de detectores de raios X. Normalmente é acoplado ao microscópio eletrônico de varredura o sistema de espectroscopia por energia dispersiva (EDS), e na grande maioria é usado o detector de energia dispersiva (EDX), pela facilidade de operação e confiabilidade.

3.5.3 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A porosimetria por intrusão de mercúrio é uma técnica experimental utilizada para a determinação do tamanho médio, volume total e distribuição dos tamanhos dos poros, superfície específica, densidade e estrutura de sólidos não compressíveis. A análise da estrutura de poros é baseada na medida do volume de mercúrio forçado a penetrar nos poros de uma amostra em função da pressão necessária. Com o aumento da pressão, o mercúrio é intrudido em poros sucessivamente menores. Na prática, para cada valor de pressão, é registrado o volume de mercúrio intrudido. Neste estudo, essa técnica foi utilizada com o intuito de buscar informações sobre a porosidade total e a distribuição dos tamanhos dos poros das amostras carbonatadas e não carbonatadas.

3.5.4 Difração de raios X

A difração de raios X é a técnica de caracterização mais indicada para a determinação de fases cristalinas presentes nos materiais, utilizada para se obter informações sobre a estrutura, composição e estado de materiais policristalinos. Dentre as vantagens dessa técnica, podemos citar a simplicidade e rapidez do método, a confiabilidade dos resultados obtidos, a possibilidade de análise de materiais compostos por uma mistura de fases e uma análise quantitativa dessas fases.

Na maior parte dos sólidos (cristais), os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de ondas dos raios X. Ao incidir em um cristal, um feixe de raios X interage com os átomos presentes, originando o fenômeno de difração. A relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram (Lei de Bragg) são característicos para cada fase

crystalina, ou seja, para cada tipo de cristal corresponde a uma série de ângulos de difração, a maneira mais simples de identificação dos constituintes da microestrutura em um espectro de difração é por comparação com o arquivo do JCPDS, onde estão armazenadas mais de 50 000 substâncias inorgânicas.

Nesse estudo, a técnica foi utilizada com o intuito de identificar as presenças do hidróxido de cálcio e do carbonato de cálcio, antes da carbonatação e após a exposição ao gás carbônico por 12 semanas.

3.5.5 Termogravimetria

A termogravimetria é utilizada para determinar mudanças na massa de uma amostra, como função da temperatura ou do tempo, quando aquecida lentamente em um forno, em uma atmosfera controlada. As mudanças de massa podem resultar de transformações químicas ou físicas. A termogravimetria é uma técnica na qual a massa da substância é medida em função da temperatura, enquanto a substância é submetida a uma programação controlada de temperatura.

Utiliza-se uma termobalança para medir a variação de massa de uma amostra em relação à temperatura. A termobalança é uma combinação de uma balança analítica eletrônica apropriada com um forno, um programador de temperatura e um computador para o controle, permitindo que a amostra seja pesada continuamente, enquanto ela é aquecida.

A maioria dos fornos possui controle de temperatura que vai desde a temperatura ambiente até temperaturas superiores a 1500°C em atmosferas inertes ou reativas. O registro é uma curva termogravimétrica (TG), onde a massa é colocada em ordenadas, com valores decrescentes de cima para baixo, e a temperatura em abcissas, com valores crescentes da esquerda para a direita. Para a resolução de curvas complexas de TG, é aconselhável registrar a curva de termogravimetria derivada DTG (fornece a derivada primeira da curva termogravimétrica em função da temperatura).

Com a DTG é possível obter-se um resultado mais detalhado do comportamento da amostra, indicando com precisão, por exemplo, a determinação da temperatura em que a velocidade de perda de massa é máxima. A avaliação da frente carbonatada por termogravimetria pode ser feita retirando-se amostras do concreto em profundidades

conhecidas e submetidas a uma taxa de elevação de temperatura da ordem de 1000°C a 1100°C.

3.6 ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DE CARBONATAÇÃO

A velocidade de carbonatação, ou taxa de movimento da frente de carbonatação, e o mecanismo de transporte de dióxido de carbono através do concreto, em geral são baseadas na 1ª lei de Fick, a qual define que a taxa de movimento é inversamente proporcional à distância da superfície (para geometrias unidimensionais), expressa segundo a Equação 3.14.

$$dx/dt = D_0/x \quad (3.14)$$

Onde:

dx/dt = taxa de movimento;

x = distância da superfície;

t = tempo;

D_0 = constante de difusão, determinada pela qualidade do concreto.

O modelo clássico de carbonatação, dado pela Equação 3.15, é também baseado nessa definição de difusão. De acordo com Kazmierczak (1995), a simplicidade dessa equação contrasta com a dificuldade de determinar o valor de k , coeficiente que resume a influência dos diversos fatores intervenientes ligados às características do concreto e do ambiente a que está exposto.

$$e_c = k \sqrt{t} \quad (3.15)$$

Onde:

e_c = espessura ou profundidade de carbonatação (mm);

k = coeficiente de carbonatação (mm / $\sqrt{\text{semana}}$);

t = tempo de exposição (semanas).

Na literatura encontram-se diversos modelos matemáticos com cálculos estimativos do processo de carbonatação que visam contemplar mais objetivamente os fatores intervenientes no mecanismo, porém, em geral, todos eles partem do modelo clássico da Equação 3.15, ou podem ser reduzidos a ela.

CAPÍTULO 4

PROGRAMA EXPERIMENTAL - MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental foi elaborado com o objetivo de verificar a influência do metacaulim em substituição ao cimento, em vários níveis, na durabilidade de concretos em relação à carbonatação pelo processo acelerado.

Neste capítulo, são apresentadas as variáveis de estudo, os materiais utilizados e suas caracterizações, a forma e dimensão dos corpos de prova adotados, o preparo dos concretos e argamassas, e por fim os métodos de acompanhamento e avaliação dos concretos.

4.1 VARIÁVEIS

As variáveis foram definidas visando ao atendimento dos objetivos propostos pela pesquisa e estão descritas a seguir.

- a) **Teor de adição mineral:** foi utilizado o metacaulim como adição mineral em substituição parcial (em massa) ao cimento. A pesquisa foi dividida em dois grupos, onde no primeiro foram moldadas amostras com misturas binárias de cimento e metacaulim, com os seguintes teores percentuais: 0%, 10%, 12,5%, 15%, 17,5% e 20%; no segundo grupo, esses teores percentuais foram 10%, 15% e 20%. A escolha desses teores foi baseada na revisão da literatura, onde os principais requisitos de desempenho e durabilidade dos concretos são atendidos dentro dessa faixa de variação, para as resistências estudadas.
- b) **Relação água/aglomerante:** a relação a/ag foi mantida constante em 0,60 no primeiro grupo de concretos e variada no segundo. Essa variação no segundo grupo teve como objetivo manter a mesma resistência à compressão em comparação ao concreto de referência e, assim, analisar os concretos com diferentes teores de adição, dentro da mesma classe de resistência.
- c) **Resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}):** o f_{ck} foi mantido igual a 30 MPa no segundo grupo, mas variou no primeiro grupo, quando se avaliaram os

concretos na mesma relação a/ag. Essa variação, cujos valores de f_{ck} obtidos estão expressos Tabela 4.1, na realidade foi uma decorrência do efeito do metacaulim na resistência mecânica, em proporcionamentos cuja relação a/ag se manteve fixa.

Na Tabela 4.1 é apresentado um resumo das variáveis independentes da pesquisa.

Tabela 4.1- Definição das variáveis independentes do programa experimental.

Teor de metacaulim	Grupo I (a/ag constante)		Grupo II (f_{ck} constante)	
	f_{ck}	a/ag	f_{ck}	a/ag
0% - Referência	30 MPa	0,60	30 MPa	0,60
10%	?	0,60	30 MPa	??
12,5%	?	0,60	-	-
15%	?	0,60	30 MPa	??
17,5%	?	0,60	-	-
20%	?	0,60	30 MPa	??

Obs: a) (?) na coluna do f_{ck} do Grupo I, haverá um aumento na resistência à compressão na medida em que se aumenta o teor de metacaulim e se mantém a relação a/ag, e b) (??) na coluna da a/ag do Grupo II, haverá um aumento na relação a/ag na medida em que se mantém o f_{ck} e se aumenta o teor de metacaulim.

Com o intuito de tornar simples e objetiva a identificação dos tipos de concreto em estudo, criou-se uma codificação que, de forma abreviada, informasse ao leitor as principais características dos concretos. Essa codificação é apresentada na Tabela 4.2, que será doravante utilizada neste trabalho.

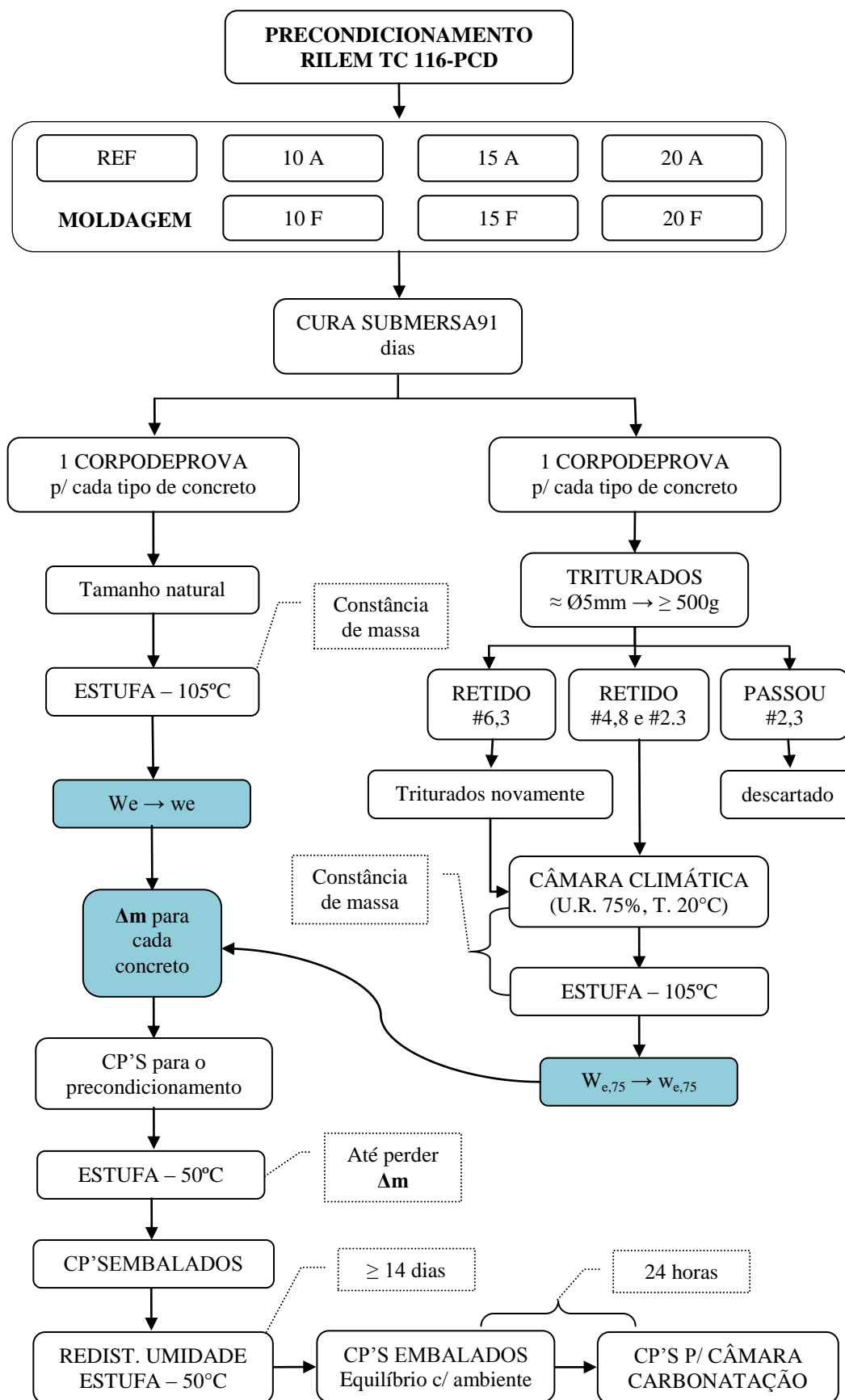
Tabela 4.2- Codificação adotada no programa experimental.

Grupo	Tipo de Concreto	Relação a/ag	Classe de resistência	Código
	0% de Metacaulim – Ref.	0,60	C30	R
GRUPO I	10% de Metacaulim	0,60	?	10A
	12,5% de Metacaulim	0,60	?	12A
	15% de Metacaulim	0,60	?	15A
	17,5% de Metacaulim	0,60	?	17A
	20% de Metacaulim	0,60	?	20A
GRUPO II	10% de Metacaulim	?	C30	10F
	15% de Metacaulim	?	C30	15F
	20% de Metacaulim	?	C30	20F

4.2 CONDIÇÕES FIXAS

- a) **Condição de cura:** foi adotada a cura úmida submersa por 91 dias, pois nessa idade os concretos com adição podem ser comparados em condições de maior igualdade com concretos sem ou com poucas adições, em termos de maturidade global, já que as reações pozolânicas são mais lentas do que as reações de hidratação do cimento. Para evitar a lixiviação dos produtos de hidratação do cimento, as amostras foram colocadas em tanque de água saturada com hidróxido de cálcio (cal hidratada).
- b) **Precondicionamento:** adotou-se a recomendação TC 116-PCD da RILEM (1999), por não existir no Brasil, até o momento do desenvolvimento da pesquisa, nenhuma norma ou recomendação referente à fase de condicionamento para ensaios de carbonatação acelerada. O condicionamento de corpos de prova é uma questão relevante no contexto da carbonatação, uma vez que diferentes umidades internas ou graus de saturação dos concretos exercem significativa influência nas profundidades carbonatadas. O condicionamento se inicia ao final do processo de cura e se encerra no início do ensaio de carbonatação acelerada, e esse procedimento possibilita que as condições iniciais de umidade interna dos corpos de prova sejam semelhantes para todos os concretos estudados a uma determinada temperatura e umidade relativa do ambiente, e também, que sejam controladas e mantidas durante todo o processo de carbonatação acelerada, o que evita que essas condições ambientais interfiram nas profundidades carbonatadas dos diversos concretos. No subitem 3.3.3.3 do capítulo anterior, são descritas todas as etapas do condicionamento e na Figura 4.1 é apresentado um fluxograma dessas etapas, baseado no TC 116-PCD da RILEM (1999). Os concretos 12A e 17A não foram submetidos ao estudo de carbonatação acelerada e, portanto, não aparecem no fluxograma.
- c) **Concreto de partida:** foi adotado um concreto de referência com resistência característica à compressão (f_{ck}) igual a 30 MPa ou de classe estrutural C30, por ser um concreto frequentemente utilizado em projetos estruturais na cidade de Goiânia e, portanto, muito representativo do mercado de construção civil local. O concreto é originário de uma empresa de serviço de concretagem de atuação local e regional, sendo então bastante usual na região. Este concreto representou tanto a situação de referência, servindo como base de comparação aos concretos com metacaulim, como significou o traço de partida, dando origem aos demais concretos.

Figura 4.1- Esquema ilustrativo das etapas do condicionamento.



- d) **Consistência:** a consistência de todos os concretos foi fixada em (130 ± 20) mm pelo abatimento do tronco de cone, de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998), por se tratar de uma faixa de abatimento que permite ao concreto tanto ser bombeado como lançado manualmente.
- e) **Teor de CO_2 :** o teor de CO_2 foi fixado em 6% para o regime de carbonatação acelerada em incubadora de CO_2 (câmara de carbonatação) devido a vários estudos realizados por diversos pesquisadores que apontaram maiores profundidades carbonatadas para concentrações com até 10% (ver subitem 3.3.1.3 do capítulo anterior).

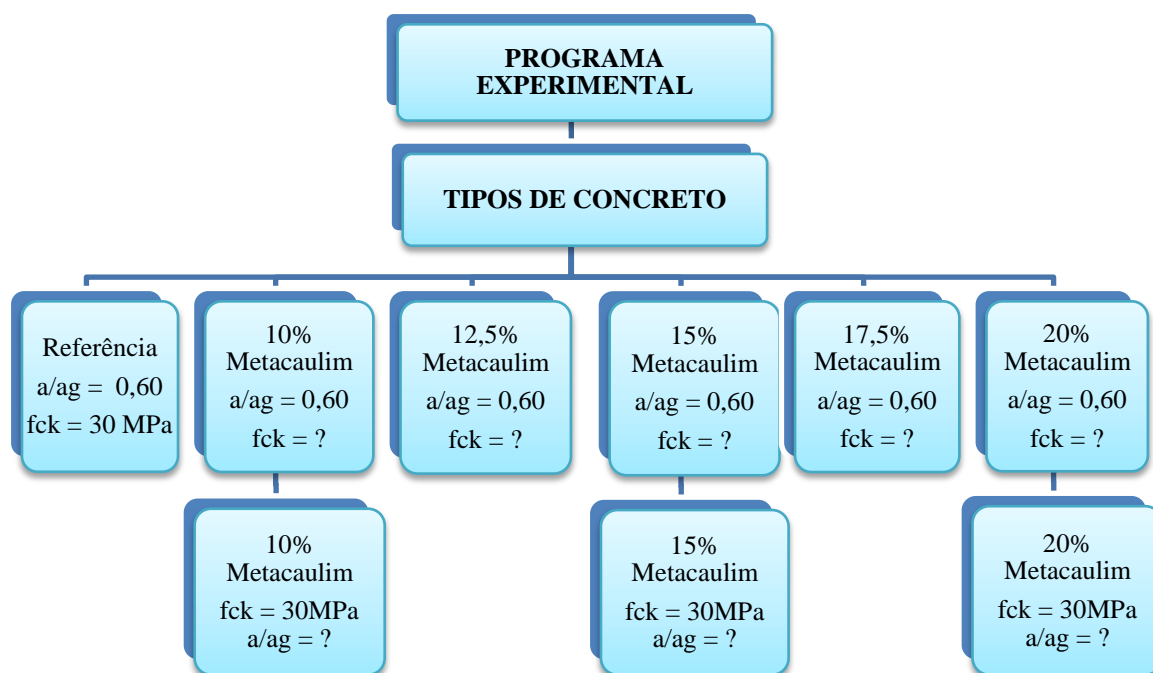
4.3 APRESENTAÇÃO GERAL DO EXPERIMENTO

A pesquisa foi desenvolvida analisando dois grupos de concretos, onde no primeiro foram variados os teores de metacaulim em 10%, 12,5%, 15%, 17,5% e 20% em substituição em massa ao cimento, mantendo a mesma relação a/ag e o mesmo abatimento do tronco de cone do concreto de referência, conseguido por meio de aditivos plastificantes e superplastificantes.

No segundo grupo, os teores variaram em níveis de 10%, 15% e 20% de metacaulim em substituição em massa ao cimento, mantendo a mesma resistência à compressão e o mesmo abatimento do tronco de cone do concreto de referência. Para se manter a mesma classe de resistência à compressão do concreto de referência, foram variadas as relações a/ag.

O fluxograma apresentado na Figura 4.2 mostra a disposição geral do experimento, onde se tem na primeira linha, logo abaixo dos tipos de concreto, o primeiro grupo e na linha seguinte o segundo grupo de concretos, objetos de análise do presente estudo.

Figura 4.2- Disposição geral do experimento.

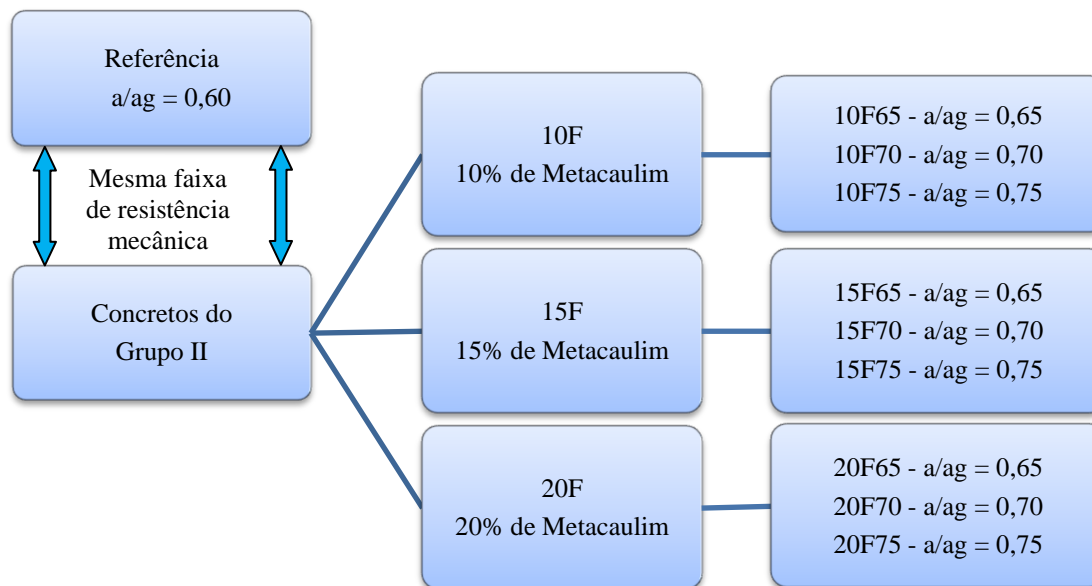


Para definir a relação a/ag para os concretos do segundo grupo com 10%, 15% e 20% de metacaulim, foi necessário um estudo piloto, onde foram dosados três concretos pilotos por nível de substituição, totalizando nove situações, as quais foram denominadas de 10F65, 10F70, 10F75, 15F65, 15F70, 15F75, 20F65, 20F70, 20F75, sendo os dois primeiros dígitos indicadores do teor de substituição do cimento por metacaulim na proporção de 10%, 15% ou 20%; a letra central indica o grupo a que pertencem os concretos (F-grupo II); e os dois últimos dígitos são indicadores da relação a/ag adotada (0,65, 0,70 e 0,75). Esses teores de metacaulim foram utilizados com base na literatura, dentro de uma faixa ótima de desempenho global em concretos.

No estudo piloto, observou-se que mantida a relação a/ag , a resistência cresceu conforme se aumentou o teor de metacaulim. O raciocínio inverso foi verificado, ou seja, para manter a resistência, foi necessário aumentar a relação a/ag à medida que se incorporavam maiores teores de metacaulim. Foram então definidas três idades (3, 7 e 14 dias) e moldados 3 corpos de prova por idade para cada tipo de concreto (9 situações), totalizando assim 81 corpos de prova. Os resultados de resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 14 dias foram tratados graficamente e, após uma projeção para a idade de 91 dias, foram obtidas as relações a/ag de 0,65 para o concreto com 10% de metacaulim, de 0,73 para o concreto com 15% de metacaulim e de 0,74 para o concreto com 20% de metacaulim. Os resultados individuais e as análises feitas para as definições das relações a/ag estão no apêndice A. A

Figura 4.3 demonstra esquematicamente o estudo piloto feito para a obtenção da relação a/ag dos concretos do segundo grupo.

Figura 4.3- Estudo para definição da relação a/ag dos concretos do segundo grupo.



Após a definição das relações a/ag dos concretos do segundo grupo, todos os concretos do primeiro e segundo grupos foram avaliados quanto à resistência à compressão nas idades de 3, 7, 28, 56 e 91 dias, e também quanto à absorção de água por imersão na idade de 91 dias.

Com exceção dos teores de 12,5% e 17,5% de metacaulim do primeiro grupo, todos os demais concretos foram analisados em relação ao ganho de massa e à profundidade carbonatada nas idades de 1, 3, 6, 9, 12 e 16 semanas de carbonatação acelerada em câmara de carbonatação, com corposdeprova na forma prismática nas dimensões de 100 mm x 100 mm x 50 mm e com dois corposdeprova por idade.

Além das análises comentadas anteriormente, foram moldados corpos de prova em argamassa com os teores de metacaulim do primeiro e do segundo grupos, com exceção dos teores de 12,5% e 17,5%, na forma prismática com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm. Nestes corpos de prova, foram avaliados aspectos da microestrutura e porosidade dos concretos, por meio de ensaios de microscopia eletrônica de varredura e porosimetria por intrusão de mercúrio, bem como aspectos da mineralogia de cada concreto, por meio de difratometria de raios X e análises termogravimétricas. Essas análises foram realizadas nas idades de 125 dias, após a cura, e depois de 12 semanas de carbonatação acelerada,

perfazendo um total de 209 dias após a moldagem, tendo sido empregados dois corpos de prova por idade.

4.4 MATERIAIS UTILIZADOS

Depois de definidas as variáveis, foram selecionados os materiais utilizados na confecção dos corpos de prova pela disponibilidade e uso no mercado e caracterizados de acordo com as normas existentes em vigor. Todos eles foram doados por uma empresa de serviço de concretagem da cidade de Goiânia, a CONCRECON.

A caracterização de todos os materiais utilizados na pesquisa, o acondicionamento, os ensaios de carbonatação acelerada com medidas da profundidade carbonatada e ganhos de massa dos concretos endurecidos carbonatados, bem como os ensaios de difratometria de raios X das argamassas antes e após a carbonatação foram realizados nos laboratórios da empresa Eletrobras FURNAS, com quem a UFG mantém parceria em pesquisas.

A seguir é apresentada a descrição e a caracterização desses materiais.

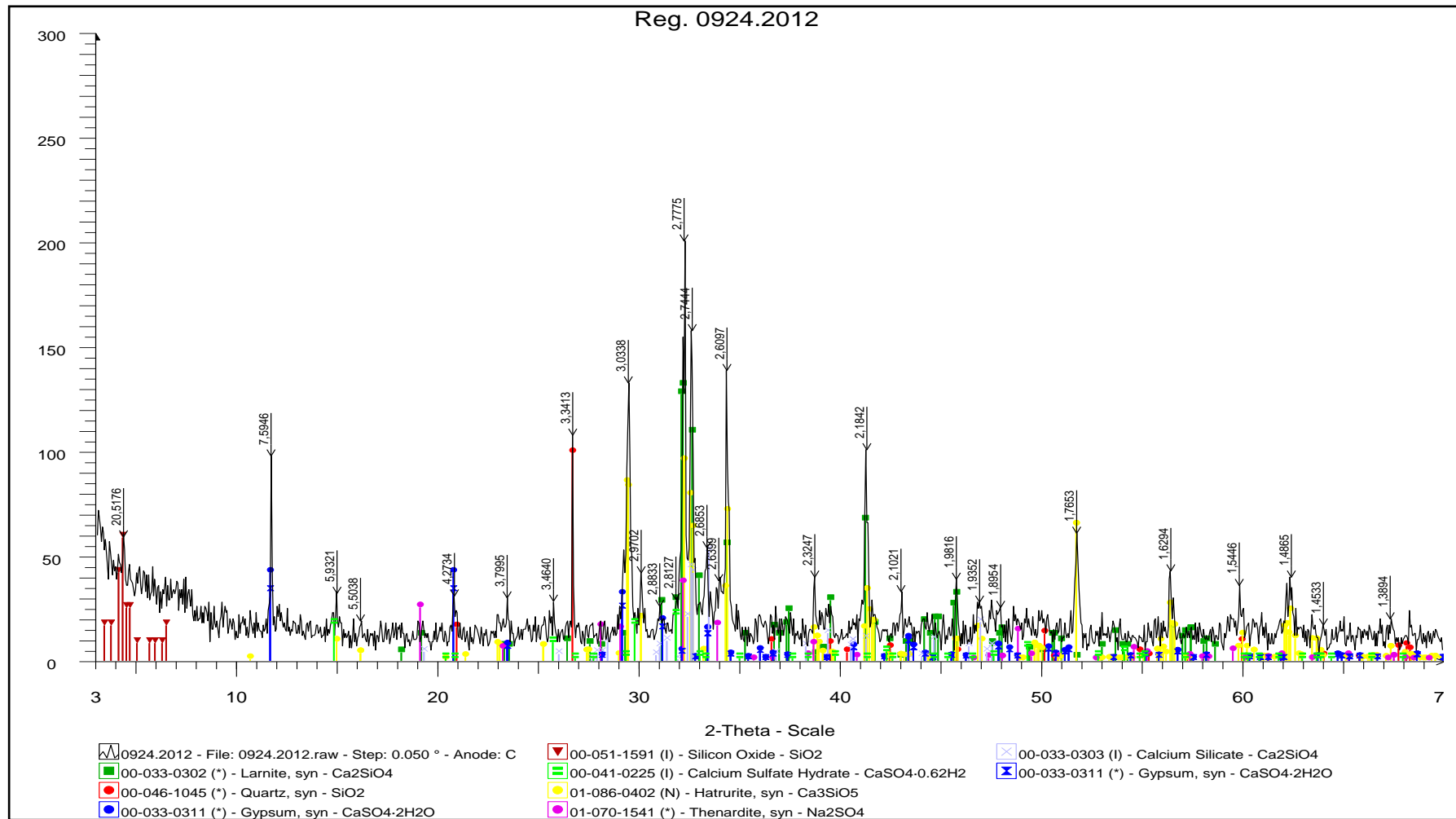
- a) **Cimento Portland:** o cimento utilizado foi o CP II F-32 da marca CIMPOR, proveniente da fábrica da cidade de Cezarina, em Goiás. Foi escolhido por não ter nenhum tipo de pozolana na sua composição e por ter apresentado, segundo relatórios de caracterização do fabricante, pouca variação em suas características ao longo do tempo analisado. Sua caracterização é apresentada na Tabela 4.3. Com o objetivo de identificar as suas principais fases mineralógicas, foi realizado também o ensaio de difração de raios X em uma amostra, como mostrado na Figura 4.4.

Tabela 4.3- Características físicas, mecânicas e químicas do cimento Portland.

Característica ou propriedade determinada		Método de ensaio	Resultado	Exigência segundo NBR 11 578 (1991)
Massa específica (kg/dm ³)		NBR NM 23/2001	3,06	N.E.*
Finura	resíduo na peneira 200 (%)	NBR 11579/2012	0,2	≤ 12
	resíduo na peneira 325 (%)	NBR 12826/1993	2,3	N.E.
	área específica Blaine (m ² /kg)	NBR NM 76/1998	438	≥ 260
Tempos de pega	início de pega (h, min)	NBR NM 65/2003	1 h, 25 min	≥ 1 h
	fim de pega (h, min)		2 h, 30 min	≤ 10 h
Água de consistência - Pasta (%)		NBR NM 43/2003	29,2	N.E.
Expansão em autoclave (%)		ASTM C151	0,0	≤ 0,8
Resistência à compressão	3 dias (MPa)	NBR 7215/1997	27,4	≥ 10
	7 dias (MPa)		38,1	≥ 20
	28 dias (MPa)		49,4	≥ 32 e ≤ 49
	90 dias (MPa)		55,2	N.E.
Calor de Hidratação (J/g)	3 dias	NBR 12006/1990	268,4	N.E.
	7 dias		275,6	N.E.
Compon. químicos (%)	perda ao fogo	NBR NM 18/2012	4,62	≤ 6,5
	resíduo insolúvel	NBR NM 15/2012	1,75	≤ 2,5
	dióxido de silício (SiO ₂)	NBR NM 11-2 /2012	20,76	N.E.
	óxido de magnésio (MgO)		1,11	≤ 6,5
	óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	IT.DCT.CA.069 FURNAS	4,60	N.E.
	óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		2,18	N.E.
	óxido de cálcio (CaO)	NBR NM 11-2 /2012	60,12	N.E.
	óxido de cálcio livre (CaO)		1,70	N.E.
	trióxido de enxofre (SO ₃)	NBR NM 16/2012	5,31	≤ 4,0
	sulfato de cálcio (CaSO ₄)	NBR NM 16/2012	9,03	N.E.
Álcalis totais (%)	óxido de sódio (Na ₂ O)	IT.DCT.CA.069 FURNAS	0,55	N.E.
	óxido de potássio (K ₂ O)		0,61	N.E.
	equivalente alcalino em Na ₂ O		0,95	N.E.
Álcalis solúveis em água (%)	óxido de sódio (Na ₂ O)	ASTM C114	0,09	N.E.
	óxido de potássio (K ₂ O)		0,27	N.E.
	equivalente alcalino		0,27	N.E.
Cloretos solúveis em água		ASTM C1218/C	0,002	N.E.
Cloretos totais		ASTM D512	0,013	N.E.
Teor de enxofre na forma de sulfeto		NBR NM 19/2012	0,02	N.E.

*N.E. = Não especificado

Figura 4.4- Difratoograma de raios X da amostra de cimento.



b) **Adição mineral:** foi utilizado o metacaulim comercializado pela Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda., por ser o único comercialmente disponível no mercado até o momento da pesquisa, sendo sua caracterização apresentada na Tabela 4.4. Também, o ensaio de difração de raios X foi realizado em uma amostra do metacaulim apresentado nas Figuras 4.5 e 4.6, denominado neste experimento como “metacaulim P”. Os picos identificados referem-se a fases cristalinas presentes no material. Os trechos com ausência de picos determinados referem-se à fase amorfa e estão ligados ao resfriamento rápido pós-calcinação, acentuando a reatividade do material.

Tabela 4.4- Principais características do metacaulim.

Característica ou propriedade determinada		Método de ensaio	Metacaulim	Exigência segundo NBR 15 894 (2010)
Massa específica (kg/dm ³)		NBR NM 23/1998	2,62	N.E.*
Área específica B.E.T. (m ² /kg)		ASTM C1069	21 000***	≥ 15 000
Resíduo na peneira de 45 µm (%)		NBR 15 894-3/2010	-	≤ 10
Umidade (%)		NBR NM 24/2003	-	≤ 2,0
Componentes químicos (%)	Perda ao fogo	NBR NM 18/2004	3,41	≤ 4,0
	SiO ₂ (dióxido de silício)	NBR NM 22/2004	54,58	≥ 44,0 e ≤ 65,0
	Al ₂ O ₃ (óxido de alumínio)	NBR NM 11-2/2009	33,19	≥ 32,0 e ≤ 46,0
	CaO + MgO (óxido de cálcio + óxido de magnésio)	NBR NM 11-2/2009	1,60	≤ 1,5
	SO ₃ (trióxido de enxofre)	NBR NM 16/2009	0,04	≤ 1,0
	Fe ₂ O ₃ (óxido de ferro)	(¹)	2,40	N.E.
Álcalis totais (%)	Na ₂ O (óxido de sódio)	NBR NM 17/2004	2,19	≤ 0,5
	K ₂ O (óxido de potássio)	NBR NM 17/2004	2,31	N.E.
	Equivalente alcalino em Na ₂ O	NBR NM 17/2004	3,71	≤ 1,5
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)		---	90,17	N.E.
Índice de atividade pozolânicaChapelle (mg Ca(OH) ₂ /gmaterial)		NBR 15 895/2010	800 – 1000**	≥ 750
Índice de desempenho com cimento aos 7 dias (%)		NBR 15 894-2/2010	-	≥ 105

(¹)Fluorescência por raios X *N.E. = Não especificado ** Dados do fabricante

***Valor obtido por média aritmética dos resultados de dois ensaios de BET provenientes de uma mesma amostra de metacaulim

Figura 4.5- Difratoograma de raios X da amostra de metacaulim.

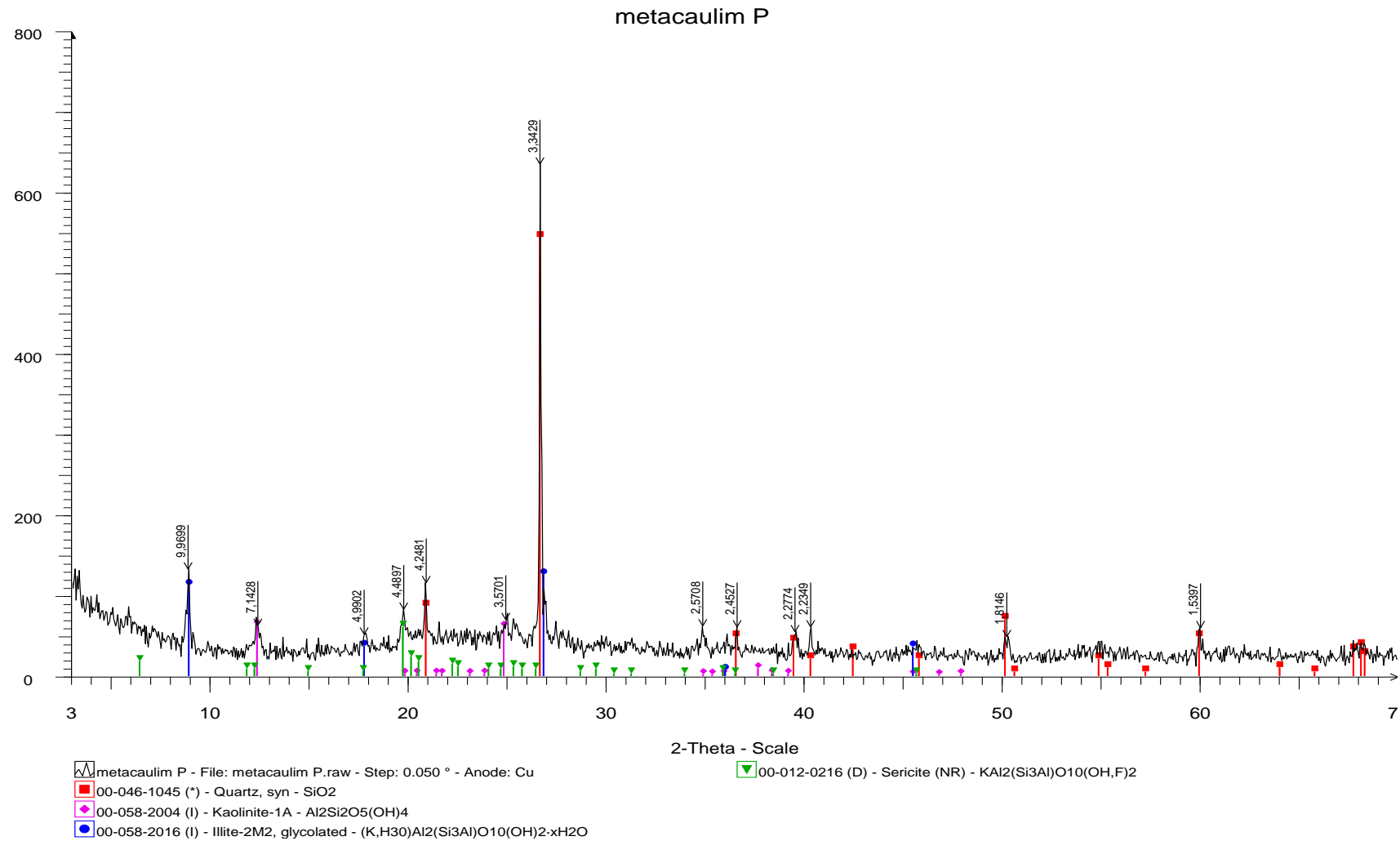
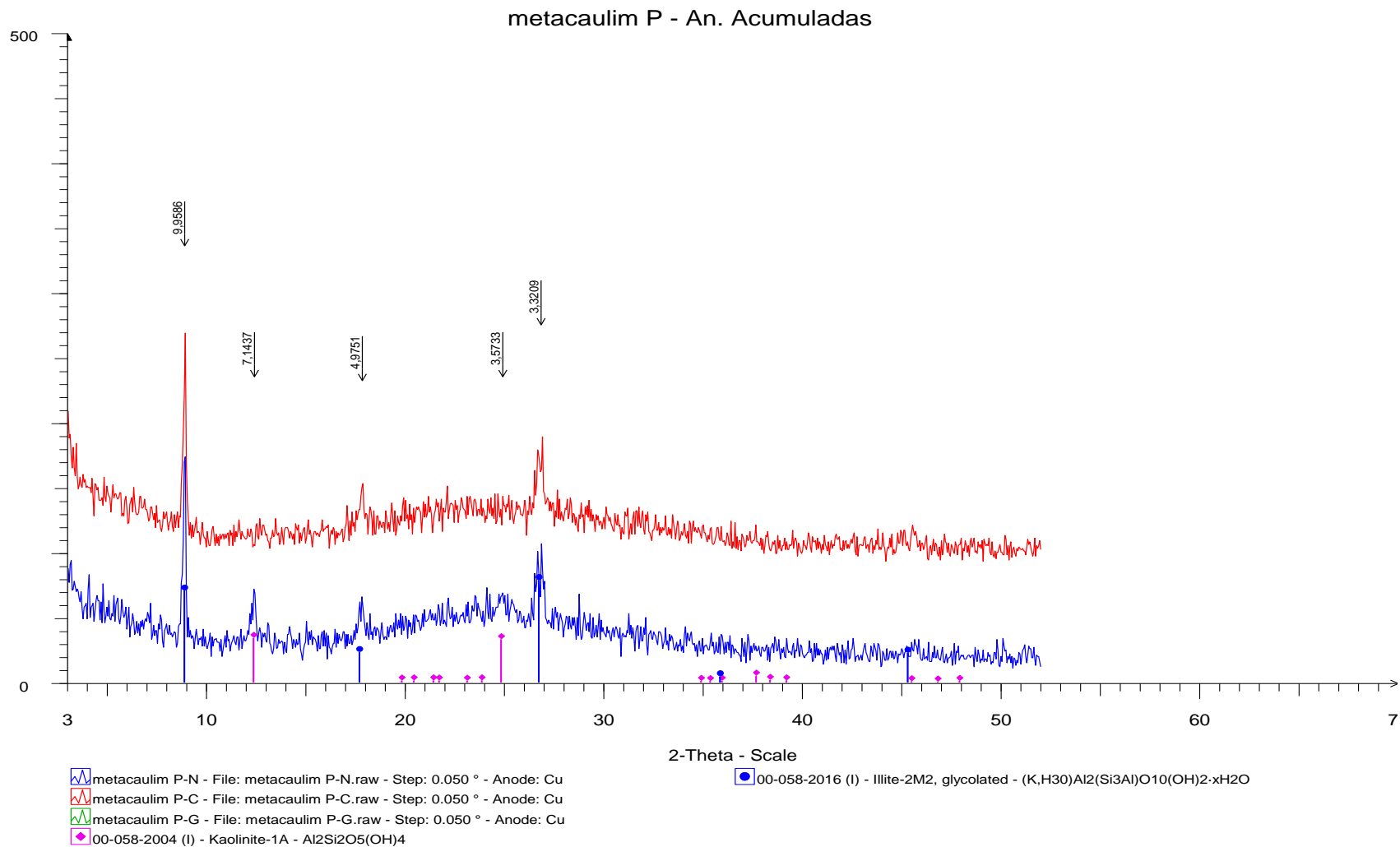


Figura 4.6- Difratoograma de raios X da amostra de metacaulim-análises acumuladas.



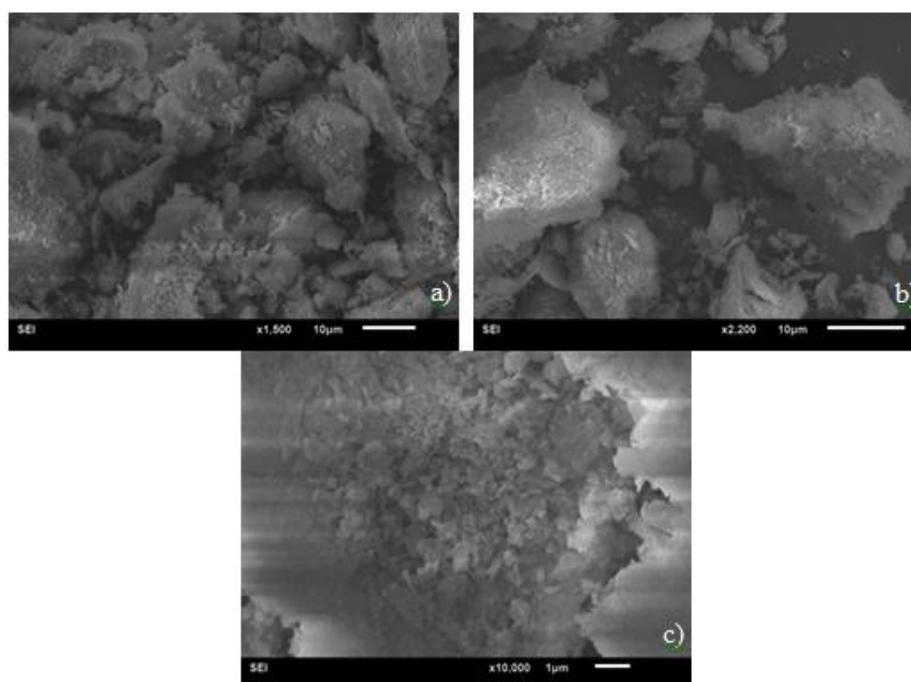
Pela análise do difratograma obtido para o metacaulim, verifica-se a presença das fases cristalinas de quartzo, dos filossilicatos (argilominerais) caulinita e ilita, e da sericita que é uma mica fina. Destas, tem-se que os picos mais acentuados referem-se ao mineral quartzo.

De forma a melhor identificar os picos obtidos referentes aos argilominerais, fez-se uma análise de difração de raios X acumulada, mostrada na Figura 4.6, sendo a primeira banda de cor azul referente à amostra analisada na condição natural, a segunda de cor vermelha analisada na condição calcinada e a última de cor verde superposta obtida por meio da análise na condição glicolada.

De acordo com a análise acumulada, verifica-se a existência dos argilominerais identificados no difratograma da Figura 4.5, percebe-se que estes não são expansivos, uma vez que não se percebe deslocamento do ângulo “2 - Theta” para a amostra submetida a análise na condição glicolada, ou seja, o ângulo “2 - Theta” do pico identificado não aumenta em relação à amostra analisada na condição natural.

Com o objetivo de verificar a morfologia e a distribuição dos grãos do metacaulim utilizado nesta pesquisa, foram realizadas análises no microscópio eletrônico de varredura, cujas micrografias estão apresentadas na Figura 4.7.

Figura 4.7- Micrografias do metacaulim utilizado na pesquisa, onde tem-se em a) magnitude de 1500 vezes, em b) magnitude de 2200 vezes e em c) magnitude de 10 000 vezes.



- c) **Aditivos:** foram utilizados dois tipos de aditivos, um polifuncional de denominação comercial RT-100[®] fabricado pela GRACE, e um superplastificante de denominação comercial ViscoCret[®] 6500 produzido pela SIKA. Com os objetivos de promover a dispersão do metacaulim e manter o mesmo abatimento do concreto de referência, foram variados os percentuais do aditivo superplastificante para cada tipo de concreto estudado, o que, via de regra, não influencia as propriedades no estado endurecido dos concretos, e dessa forma não se comporta como uma variável. A base química e a massa específica dos aditivos utilizados estão apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5- Base química e massa específica dos aditivos empregados.

Tipo de aditivo	Base	Massa específica (kg/dm ³)	Nome comercial
Plastificante	Lignosulfonato	1,20	RT - 100 GRACE
Superplastificante	Policarboxilato	1,08 ± 0,02	ViscoCret 6500 SIKA

Obs.: os dados foram fornecidos pelo fabricante.

- d) **Agregado graúdo:** foram utilizados dois tipos de agregados graúdos, um de zona granulométrica d/D igual a 4,75/12,5 (brita 0), e o outro d/D igual a 9,5/25 (brita 1), ambos de origem litológica calcária, com módulo de finura de 5,75 e 6,75, respectivamente. Suas principais características são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6- Caracterização dos agregados graúdos.

Ensaio realizado	Método	Brita 12,5 mm	Brita 19,0 mm	Exigência segundo NBR 7211 (2009)
Abrasão Los Angeles (%)	NBR NM 51/2001	49 (Graduação B)		N.E.*
Absorção de água (%)	NBR NM 53/2009	0,6	0,4	N.E.*
Módulo de finura	NBR NM 248/2003	5,75	6,75	N.E.*
Massa específica seca (kg/dm ³)	NBR NM 53/2009	2,73	2,74	N.E.*
Massa específica S.S.S. (kg/dm ³)	NBR NM 53/2009	2,70	2,72	N.E.*
Massa específica aparente(kg/dm ³)	NBR NM 53/2009	2,68	2,70	N.E.*
Massa unitária no estado solto – seco – (kg/dm ³)	NBR NM 45/2006	1,41	1,40	N.E.*
Sanidade ao ataque Na ₂ SO ₄ (%)	ASTM C 88	0,37		N.E.*
Teor de material pulverulento (%)	NBR NM 46/2003	1,47	0,98	≤ 1,0

*N.E. = Não especificado

e) **Agregado miúdo:** foram utilizados dois tipos de agregados miúdos. Um deles é uma areia natural de rio constituída predominantemente por grãos de quartzo, com módulo de finura de 1,98, proveniente da região de Israelândia, Goiás, cuja distribuição granulométrica está apresentada na Figura 4.8. O outro agregado miúdo é uma areia artificial, obtido da britagem do granulito (rocha resultante da metamorfose do granito), com módulo de finura de 2,79, cuja distribuição granulométrica está apresentada na Figura 4.9. Ambas as areias são utilizadas correntemente no traço comercial adotado pela concreteira. As areias natural e artificial oscilam entre os limites granulométricos de zonas ótima e utilizável, e suas principais características são apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7- Caracterização dos agregados miúdos.

Ensaio realizado	Método	Areia artificial	Areia natural	Exigência segundo NBR 7211 (2009)
Absorção de água (%)	NBR NM 53/2009	0,5	0,6	N.E.*
Módulo de finura	NBR NM 248/2003	2,79	1,98	N.E.*
Massa específica aparente do agregado seco - (kg/dm ³)	NBR NM 52/2009	2,62	2,57	N.E.*
Massa específica saturada superfície seca - (kg/dm ³)	NBR NM 52/2009	2,64	2,58	N.E.*
Massa específica (kg/dm ³)	NBR NM 52/2009	2,66	2,61	N.E.*
Massa unitária no estado solto – seco – (kg/dm ³)	NBR NM 45/2006	1,61	1,55	N.E.*
Sanidade ao ataque Na ₂ SO ₄ (%)	ASTM C88	1,15	0,65	N.E.*
Teor de matéria orgânica (+/- clara)	NBR NM 49/2001	---	+ Clara	+clara que a solução padrão
Teor de material pulverulento (%)	NBR NM 46/2003	6,59	0,47	≤ 5,0**
Teor de argila em torrões e mat. friáveis (%)	NBR 7218/2010	---	0,01	≤ 3,0
Teor de partículas leves (%)	NBR 9936/1987	---	0,14	N.E.*

*N.E. = Não especificado. ** Em concreto submetido a desgaste superficial, este limite passa a ser 3%.

Figura 4.8- Gráfico da distribuição granulométrica da areia natural.

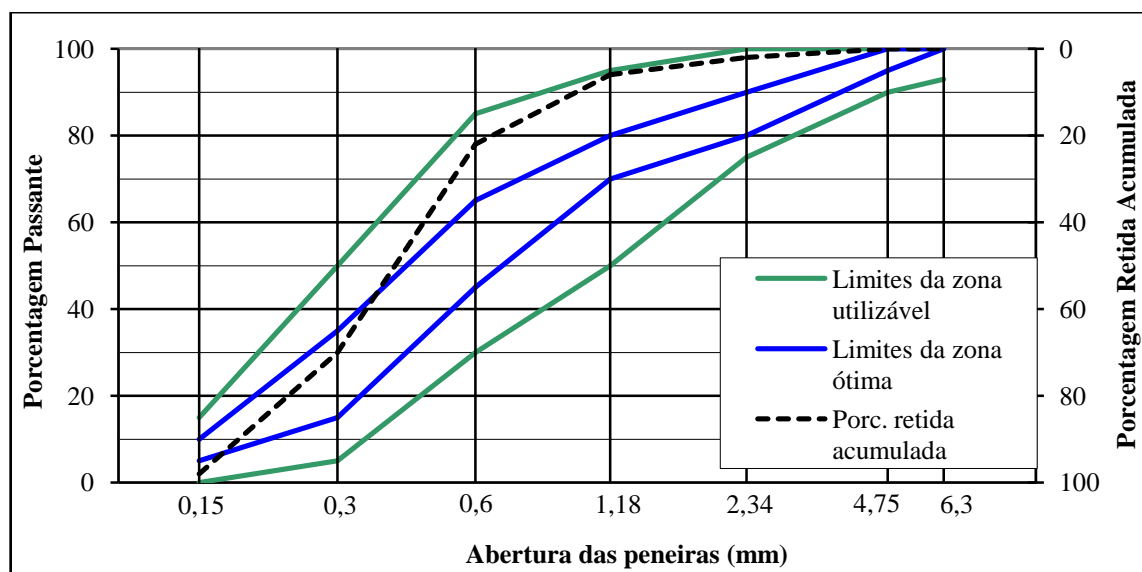
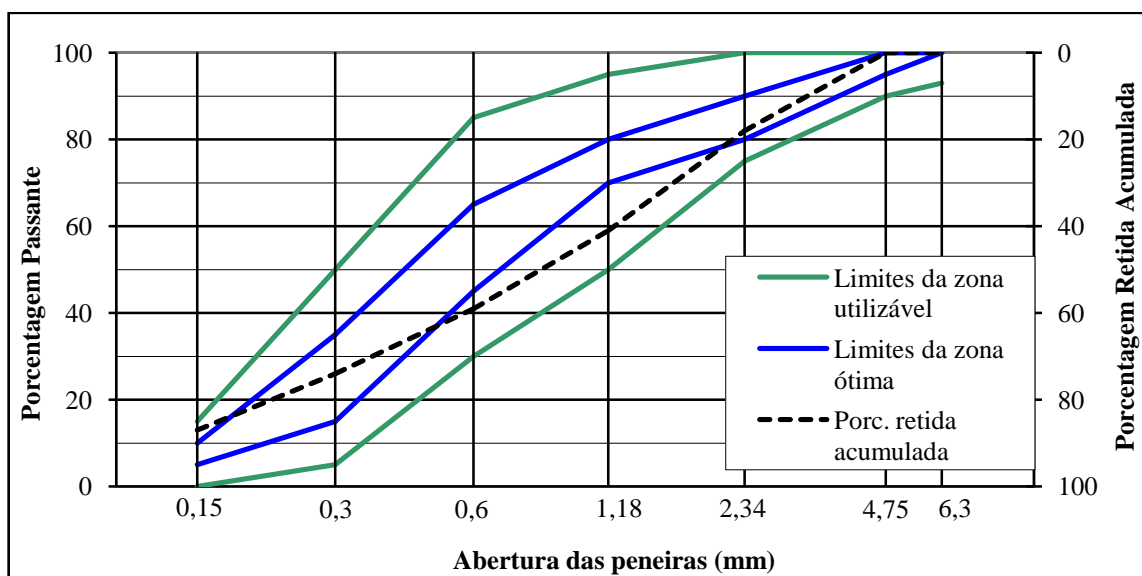


Figura 4.9- Gráfico da distribuição granulométrica da areia artificial.



- f) **Água:** foi utilizada água de abastecimento local fornecida pela concessionária do Estado de Goiás (SANEAGO).

4.5 DOSAGEM E PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

O estudo da composição dos concretos foi realizado nas dependências da CONCRECON, de onde foram definidos os proporcionamentos de todos os concretos, a partir de um traço comercial sem adição, denominado de traço de referência (R).

A moldagem, a cura e os ensaios de resistência à compressão e absorção de água por imersão de todos os concretos foram realizados nas dependências do laboratório Carlos Campos, empresa privada da cidade de Goiânia e parceira da UFG em pesquisas.

4.5.1 Dosagem dos concretos

O concreto de referência escolhido foi o de classe estrutural C30 e todos os demais estudados neste trabalho foram concebidos a partir do referência. O método de dosagem empregado para se obter esse traço de referência foi baseado no preconizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Este método tem como principal característica, a de permitir o uso do agregado que estiver disponível no local, sem muita preocupação com a composição granulométrica estabelecida através de modelos teóricos; é bastante simples e eficiente além de ser um dos mais difundidos no Brasil.

O proporcionamento de todos os concretos na betoneira foi feito em massa, sendo que nos concretos com adição, a substituição do cimento por metacaulim, ocasionou um excedente em volume de material devido à diferença de densidades entre os aglomerantes. Esse volume excedente foi transformado em massa e subtraído do traço por valores proporcionais ao percentual representativo de cada material em relação ao todo; assim se manteve as mesmas proporções entre os aglomerantes e os outros materiais constituintes para todos os concretos estudados. Os consumos dos materiais (proporcionamentos em kg/m^3) desses concretos estão apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8- Consumo de materiais dos concretos em estudo.

Materiais /Concretos	R	10A	12A	15A	17A	20A	10F	15F	20F
Cimento (kg/m ³)	310,00	278,21	270,23	262,26	254,31	246,43	274,10	252,78	236,51
Metacaulim (kg/m ³)	0	30,91	38,60	46,28	53,95	61,61	30,46	44,61	59,13
Areia natural (kg/m ³)	520,00	518,53	518,04	517,55	517,08	516,71	510,86	498,84	495,90
Areia artificial (kg/m ³)	342,00	341,04	340,71	340,39	340,08	339,83	335,99	328,08	326,15
Brita 0 (kg/m ³)	305,00	304,14	303,85	303,56	303,29	303,07	299,64	292,59	290,87
Brita 1 (kg/m ³)	715,00	712,99	712,30	711,63	710,99	710,47	702,44	685,90	681,87
Água (kg/m ³)	185,00	184,48	184,30	184,13	183,96	183,83	198,45	215,84	219,34
Plastificante = 0,9% (kg/m ³)	2,79	2,78	2,78	2,78	2,77	2,77	0,91	0,89	0,89
Superplastificante (kg/m ³)	0	0,77	1,24	1,70	2,10	2,31	-	-	-
Teor de argamassa (α)	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53

4.5.2 Produção dos corpos de prova

Foram preparados corpos de prova com três diferentes geometrias e dimensões, dois de concreto e um de argamassa. Os de concreto foram corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura; e corpos de prova prismáticos de 100 mm x 100 mm x 50 mm. O corpo de prova de argamassa foi moldado na forma prismática com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm.

Os corpos de prova cilíndricos de concreto foram concebidos para os ensaios de resistência à compressão simples e de absorção de água por imersão. Para o ensaio de resistência à compressão simples foram produzidos três corpos de prova por idade (3, 7, 28, 56 e 91 dias) e por tipo de concreto (9 situações), totalizando assim 135 corpos de prova (3 CPs x 5 idades x 9 concretos = 135 CPs). Para o ensaio de absorção de água por imersão foram produzidos três corpos de prova para análise apenas na idade de 91 dias, tendo sido consideradas sete situações de concreto (não foram ensaiados os concretos 12A e 17A, ou seja, os concretos na mesma relação a/ag com 12,5% e 17,5% de metacaulim, respectivamente), totalizando assim 21 corpos de prova (3 CPs x 1 idade x 7 concretos = 21 CPs).

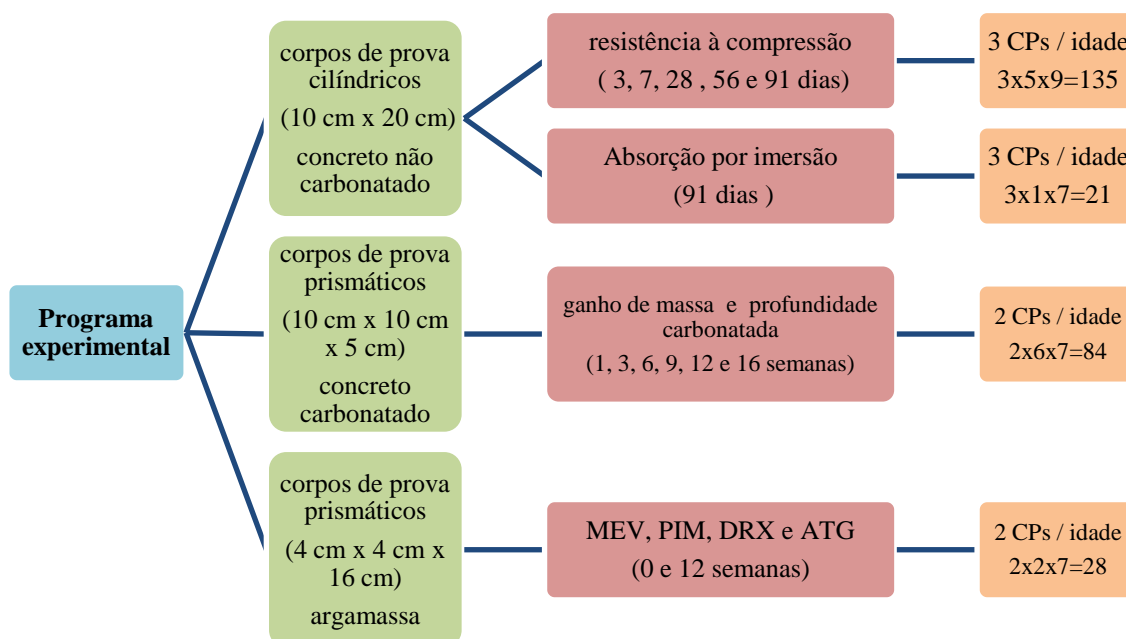
Os corpos de prova de concreto prismáticos nas dimensões de 100 mm x 100 mm x 50 mm foram moldados em fôrmas de madeira confeccionadas em chapas compensada de 10 mm de espessura e revestidas com MDF de 4 mm. Eles foram concebidos para o estudo de

carbonatação acelerada, sendo dois corpos de prova por idade (3, 6, 9, 12 e 20 semanas) e por tipo de concreto (sete situações),totalizando dessa forma 84 corpos de prova (2 CPs x 6 idades x 7 concretos = 84 CPs). Além destes, foram moldados mais três corpos de prova para cada tipo de concreto visando ao estabelecimento dos parâmetros do condicionamento, totalizando 105 corpos de prova (84 corpos de prova do estudo de carbonatação mais 21 do condicionamento).

Os corpos de prova de argamassa na forma prismática, com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm, foram moldados em fôrmas metálicas de alumínio e concebidos para as análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV),porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM), difratometria de raios X (DRX) e termogravimetria (ATG), sendo dois corpos de prova por idade (0 e 12 semanas) e por tipo de concreto (7 situações),totalizando 28 corpos de prova (2 CPs x 2 idades x 7 concretos = 28 CPs).Além destes, foram moldados mais quatro corpos de prova para cada situação para estabelecimento dos parâmetros do condicionamento (4 CPs x 7 concretos = 28 CPs), totalizando 56 corpos de prova.

A Figura 4.10 apresenta um fluxograma dos tipos e distribuição dos corpos de prova do programa experimental, sem considerar aqueles utilizados para determinação dos parâmetros do condicionamento.

Figura 4.10- Fluxograma dos diferentes tipos e da distribuição dos corpos de prova.



4.5.2.1 Mistura, moldagem e cura dos corpos de prova

A mistura do concreto foi realizada em betoneira previamente imprimada, com volume total de 120 litros e capacidade final de mistura de 65 litros, em ambiente de laboratório, com variação de temperatura entre 23°C e 27°C.

A sequência de introdução dos materiais na betoneira e o tempo de amassamento seguiram os procedimentos do laboratório da CONCRECON, obedecendo à seguinte ordem:

- a) imprimação da betoneira, ou seja, foram introduzidos no seu reservatório uma pequena quantidade de material com as mesmas proporções do traço a ser rodado, e após o movimento por três minutos, esse material foi descartado, ficando somente o que estava impregnado nas paredes e pás internas da betoneira;
- b) com a betoneira parada e imprimada, foram colocados os agregados graúdos e miúdos e parte da água de amassamento;
- c) a adição mineral foi diluída com parte da água de amassamento e dispersada com o aditivo plastificante;
- d) após uma pequena movimentação, foram introduzidos o cimento e a adição mineral dispersada com aditivo em água;
- e) com a betoneira em movimento, foi adicionado o restante da água, deixando misturar por cinco minutos;
- f) quando foi necessário o uso de superplastificante, pequena parte da água de amassamento foi separada ($\pm 1,0$ litro) para a sua diluição e, depois de acrescentada, procedia-se a rotação da betoneira por mais cinco minutos ininterruptos para a sua completa incorporação e ação.

Após a parada da betoneira, foram realizados os ensaios de abatimento do tronco de cone e de teor de ar, de acordo com as normas brasileiras, no exato momento em que o material era descarregado da betoneira.

O concreto foi colocado dentro dos moldes por meio de conchas, após ter sido descarregado e transportado por meio de carrinho de mão metálico, e adensado utilizando-se vibrador elétrico de imersão (vibrador de agulha). Os corpos de prova de argamassa foram obtidos por meio de peneiramento do concreto para retirada do agregado graúdo, e o produto desse peneiramento foi colocado em moldes metálicos e adensados. A moldagem e

o adensamento de todos os corpos de prova seguiram as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2003).

Na Figura 4.11, estão ilustradas algumas das etapas e procedimentos relativos à moldagem e produção dos corpos de prova, bem como à execução dos ensaios do concreto no estado fresco. Essas ilustrações e etapas são as seguintes: a) ilustração dos diferentes agregados graúdos e miúdos pesados e separados em bandejas metálicas; b) dispersão prévia do metacaulim em parte da água de amassamento com o dispersante diluído; c) concreto misturado na betoneira pronto para ser moldado; d) execução do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone; e) execução do ensaio de massa específica do concreto fresco; f) concretos moldados em fôrma cilíndrica com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura; g) execução do ensaio de teor de ar; h) argamassa moldada em fôrma prismática de 40 mm x 40 mm x 160 mm; i) concretos moldados em fôrma de madeira prismática com dimensões de 100 mm x 100 mm x 50 mm.

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram durante aproximadamente 24 horas dentro do laboratório, cobertos com manta umedecida. Após esse período, as amostras foram desmoldadas, identificadas e colocadas em tanques com água saturada com cal para o início do processo de cura, que perdurou por 91 dias.

Figura 4.11- Detalhes da moldagem e ensaios de caracterização do concreto no estado fresco, onde se observa em: a) agregados pesados em bandejas metálicas, b) dispersão do metacaulim, c) concreto misturado pronto para moldagem, d) execução do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, e) ensaio de massa específica, d) concreto moldado em fôrma cilíndrica, e) ensaio de teor de ar, f) argamassa moldada em fôrma prismática 40x40x160mm, g) concreto moldado em fôrma prismática 100x100x50mm.



4.5.2.2 Precondicionamento dos corpos de prova

Após 91 dias de cura úmida submersa, amostras para a determinação dos parâmetros necessários ao condicionamento foram retiradas com parte da água saturada dos tanques de cura e transportadas em caixas térmicas até o laboratório.

No processo de trituração das amostras, para se conseguir o material necessário em quantidade (≥ 500 g) e dimensões (partículas aproximadamente iguais a 5 mm), como recomenda o TC 116-PCD da RILEM (1999), foi feito um teste piloto utilizando algumas técnicas e equipamentos disponíveis. O procedimento que se mostrou mais adequado consistiu na execução do processo em duas etapas. Na primeira, as amostras passaram uma vez através de um britador utilizado para triturar pedras e, na segunda, por um equipamento metálico denominado “quebra-gelo” (idêntico a um pilão), onde o material, obtido após a passagem no britador, foi triturado manualmente.

O material triturado durante as duas etapas foi peneirado em um conjunto de peneiras com aberturas de malha de 6,3 mm, 4,8 mm e 2,3 mm, sobrepostas nesta sequência. As frações do material que passaram na peneira 2,3 mm e que ficaram retidas na peneira de 6,3 mm foram descartadas, e as que ficaram retidas nas peneiras 4,8 mm e 2,3 mm foram utilizadas para os procedimentos do condicionamento. Para esse processo foram utilizados dois corpos de prova de argamassa (4 cm x 4 cm x 16 cm) e um corpo de prova de concreto (10 cm x 10 cm x 5 cm). Na fotografia a) da Figura 4.12 é mostrado o material resultante após a passagem pelo britador, antes da trituração manual no quebra-gelo.

Os materiais, obtidos do processo de trituração, foram colocados em bandejas metálicas e identificados de acordo com cada uma das misturas e com as dimensões do corpo de prova, perfazendo um total de 14 situações, conforme ilustra a fotografia b) da Figura 4.12. As bandejas foram levadas a uma câmara climática, em condições preestabelecidas de umidade relativa de $(75 \pm 2)\%$ e de temperatura de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, e monitorados diariamente, por meio da verificação de suas massas, até atingirem a constância (diferença $\leq 0,1$ g entre duas leituras consecutivas de 24 horas). Depois de atingirem a constância, as massas de equilíbrio de cada situação, denominadas de “ $m_{e,75}$ ”, foram anotadas em formulário próprio e levadas para uma estufa ventilada com temperatura controlada de 105°C até a constância (diferença $\leq 0,1$ g entre duas leituras consecutivas de 24 horas). Após atingirem a constância, as massas secas de cada situação, denominadas de “ $m_{d,75}$ ”, foram anotadas no

mesmo formulário. Com os dados das massas de equilíbrio e massas secas, foram calculadas a quantidade de água evaporável no equilíbrio “ $W_{e,75}$ ”, e a concentração de umidade de equilíbrio “ $w_{e,75}$ ”, de acordo com as Equações 3.10 e 3.11, respectivamente.

Figura 4.12- Material utilizado no processo de dessorção do condicionamento, onde se vê em a) material obtido após passagem pelo britador, e em b) material após a trituração no quebra gelo.



Ao mesmo tempo em que se faziam os procedimentos com o material triturado, eram feitos os procedimentos para os corpos de prova de concreto e argamassa no seu estado natural (sem moagem). Os corpos de prova foram tirados da caixa térmica, a superfície foi seca com pano umedecido e foram anotadas suas massas, em formulário próprio, todos no estado saturado superfície seca, denominadas de “mo”. Foram levados para uma estufa ventilada com temperatura controlada de 105°C até a constância de massa (diferença $\leq 0,5$ g entre duas leituras consecutivas de 24 horas) e, após atingirem a constância, as massas secas de cada situação, denominadas de “md”, foram anotadas no mesmo formulário. Com os dados das massas de equilíbrio e massas secas, foram calculadas a quantidade de água evaporável (W_e) e a concentração de umidade evaporável (w_e) de acordo com as Equações 3.8 e 3.9, respectivamente.

Com os dados obtidos nas Equações de 3.8 a 3.10, calculou-se a perda de massa necessária durante a pressecagem (denominada “ Δm ”), obtida de acordo com a Equação 3.12, e anotada em formulário próprio, para cada situação estudada.

Foram necessários aproximados 20 dias para se concluir todo o processo para a determinação da quantidade de massa a ser perdida durante a pressecagem. Após esse período, todos os corpos de prova de cada situação foram transportados em caixas térmicas e submetidos ao processo de perda de massa (precondicionamento), que consistiu na secagem de suas superfícies com pano umedecido, pesagem no estado saturado superfície seca e suas massas anotadas em formulário próprio. Fez-se o cálculo da perda de massa

para cada corpo de prova por meio de regra de três simples, utilizando os parâmetros obtidos na etapa anterior, para cada situação, e anotadas no mesmo formulário. Os corpos de prova foram levados para uma estufa ventilada, com temperatura controlada de 50°C, e monitorados até a perda de massa requerida para cada corpo de prova, com precisão de 5%, de acordo com a equação 3.13. Para esse monitoramento, fez-se o cálculo da perda de massa necessária com os intervalos permitidos de $\pm 5\%$ para cada corpo de prova de cada situação e anotadas em formulário próprio.

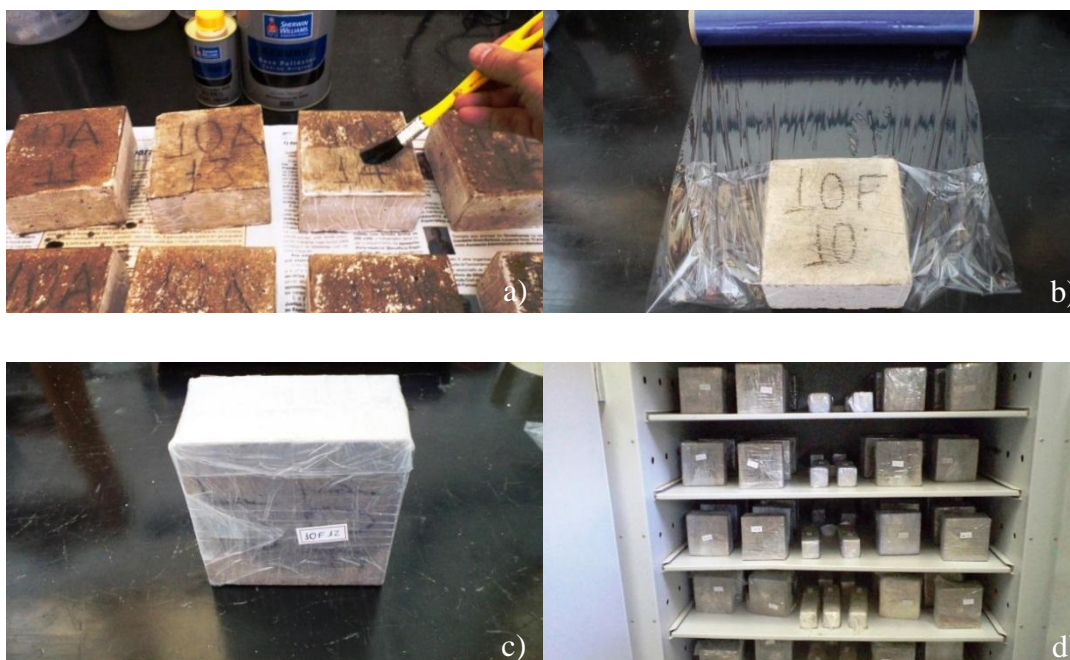
Nas etapas do condicionamento até a fase de redistribuição de umidade, foram tomados os cuidados de colocar junto às amostras, tanto na estufa como na câmara climática, quantidades de cal sodada, com a finalidade de capturar e reagir com o CO₂ do ar e, com isso, evitar a carbonatação precoce das amostras.

Na medida em que os corpos de prova atingiam a perda de massa necessária, as amostras de concreto eram impermeabilizadas na parte superior e inferior, para se evitar a soma de vetores de difusão de CO₂ nessas direções e a conseqüente majoração dos valores na determinação das profundidades carbonatadas. Utilizou-se, para tanto, duas demãos de verniz bicomponente à base de poliuretano, de marca comercial Lazzudur[®], fabricado pela Sherwin Williams. Após a secagem do verniz, com duração aproximada de 30 minutos, todos os corpos de prova (argamassa e concreto) foram embrulhados com filme de PVC em várias camadas e colocados em sacos plásticos de polipropileno metalizado e lacrados com fita adesiva transparente em todas as direções, procedimento utilizado para não perder ou ganhar umidade para o meio externo.

Após selados e embalados, os corpos de prova voltaram para a estufa, com temperatura controlada de 50°C, para a fase de redistribuição de umidade, onde permaneceram por, no mínimo, 14 dias. Após a redistribuição de umidade, os corpos de prova foram retirados da estufa e colocados no laboratório, ficando aptos para o procedimento de carbonatação acelerada, sendo deixados por 24 horas para o equilíbrio de temperatura com o ambiente. Após esse período, as amostras foram retiradas das embalagens, colocadas em uma incubadora de CO₂ e iniciou-se o processo de carbonatação acelerada. Foram necessários, em média, 30 dias para a conclusão de todo o processo de condicionamento dos corpos de prova, desde a saída dos tanques de cura até a entrada na incubadora de CO₂ para o início do processo de carbonatação acelerada.

Na Figura 4.13 são ilustrados as etapas do condicionamento de corpos de prova, desde o procedimento de impermeabilização até o acondicionamento na estufa, que é a última fase do condicionamento.

Figura 4.13- Etapas do condicionamento de corpos de prova, onde se observa: em a) aplicação de verniz poliuretano, em b) envelopamento com filme de PVC, em c) corpo de prova embrulhado com saco plástico de polipropileno metalizado e em d) corpos de prova em estufa ventilada para redistribuição de umidade.



4.6 MÉTODOS

Os concretos foram avaliados no seu estado fresco, endurecido e endurecido carbonatado, e as argamassas no endurecido e endurecido carbonatado, sendo que as caracterizações e avaliações foram feitas pelos métodos e ensaios que estão descritos no subitem 3.4.

4.6.1 Caracterização do concreto fresco

Os concretos no estado fresco foram avaliados de acordo com as seguintes propriedades: consistência pelo abatimento do tronco de cone, segundo a NBR NM 67 (ABNT, 1998); massa específica, de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2008); e teor de ar, conforme a NBR NM 47 (ABNT, 2002). Os valores estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9- Parâmetros de dosagem dos concretos e caracterização no estado fresco.

Tipo de Concreto		R	10A	12A	15A	17A	20A	10F	15F	20F
Relação água/aglomerante		0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,65	0,73	0,74
Traço em massa de aglomerante (cimento : adição : areia : brita)		1 : 0,00 : 2,78 : 3,29	0,90 : 0,10 : 2,78 : 3,29	0,87 : 0,13 : 2,78 : 3,29	0,85 : 0,15 : 2,78 : 3,29	0,82 : 0,18 : 2,78 : 3,29	0,80 : 0,20 : 2,78 : 3,29	0,90 : 0,10 : 2,78 : 3,29	0,85 : 0,15 : 2,78 : 3,29	0,80 : 0,20 : 2,78 : 3,29
Massa de aglomerante (kg/m ³) (cimento + adição)		310,00	309,03	308,87	308,62	308,38	308,13	304,86	298,26	296,21
Traço em massa de cimento (cimento : adição : areia : brita)		1 : 0 : 2,78 : 3,29	1 : 0,11 : 3,09 : 3,65	1 : 0,14 : 3,18 : 3,76	1 : 0,18 : 3,27 : 3,87	1 : 0,21 : 3,37 : 3,99	1 : 0,25 : 3,48 : 4,11	1 : 0,11 : 3,09 : 3,65	1 : 0,18 : 3,27 : 3,87	1 : 0,25 : 3,48 : 4,11
Consumo de cimento (kg/m ³)		310,00	278,13	270,26	262,33	254,41	246,50	274,37	253,52	236,97
Teor de argamassa em massa (α) ⁽¹⁾		0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
Teor de aditivo químico em relação à massa de aglomerante (%)	Plastificante	2,79 kg	2,79 kg	2,78 kg	2,78 kg	2,78 kg	2,77 kg	0,93 kg	0,93 kg	0,93 kg
	Super plastificante	0	0,77 kg	1,24 kg	1,70 kg	2,10 kg	2,31 kg	-	-	-
Consistência pelo abatimento do tronco de cone - NBR NM 67:1998	Valor requerido (mm)	130 \pm 20	130 \pm 20	130 \pm 20	130 \pm 20	130 \pm 20	130 \pm 20	130 \pm 20	130 \pm 20	130 \pm 20
	Valor medido (mm)	135	125	120	150	155	150	110	-	-
Queda na consistência pelo abatimento do tronco de cone (mm) ⁽²⁾		80	80	70	70	85	90	-	-	-
Massa específica (kg/dm ³) - NBR 9833 : 2008		2,38	2,36	2,33	2,36	2,35	2,35	2,29	2,28	2,29
Teor de ar (%) - NBR NM 47: 2002		2,70	3,30	3,70	3,00	2,90	2,90	5,90	5,30	4,10

(1) Onde: $\alpha = (c+ad+a)/(c+ad+m)$, sendo c = cimento, ad = adição, a = areia, p = pedra, $m = a + p$

(2) Neste caso o abatimento é verificado após a parada da betoneira por 30 minutos e depois batendo por mais 15 minutos.

4.6.2 Avaliação dos concretos endurecidos não carbonatados

Os concretos no estado endurecido (não carbonatados) foram avaliados de acordo com as seguintes propriedades: resistência à compressão simples de acordo com as prescrições da norma NBR 5739 (ABNT, 2007), para as idades de 3, 7, 28, 56 e 91 dias; absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009), para a idade de 91 dias, logo após o processo de cura.

Os ensaios de resistência à compressão foram executados com o intuito de verificar a evolução da resistência dos concretos ao longo do tempo (durante o processo de cura - até 91 dias) e analisar as velocidades das reações pozolânicas em relação ao metacaulim utilizado e, com isso, dar suporte para as análises do estudo da carbonatação. Espera-se que ao longo do tempo esses concretos ganhem resistência gradativamente, devido às reações de hidratação do cimento, e que os concretos com adição metacaulim, possivelmente com menores resistências nas primeiras idades, devido às reações pozolânicas que são mais lentas, ao final dos 91 dias.

Os ensaios de absorção de água por imersão foram executados para se verificar uma possível alteração na porosidade dos vários concretos estudados e também para verificar se os teores de adição utilizados teriam influência nessa porosidade. De maneira indireta e qualitativa, esse ensaio visou avaliar os concretos estudados em relação à durabilidade. A determinação do percentual de absorção de água é considerada por muitos pesquisadores como um bom indicativo das condições de porosidade dos concretos, conseqüentemente de sua resistência frente à penetração de líquidos e gases agressivos.

4.6.3 Avaliação dos concretos endurecidos carbonatados

Nos concretos endurecidos carbonatados foram avaliadas as profundidades carbonatadas médias e os ganhos de massa, para as idades de 1,3, 6, 9, 12 e 16 semanas.

A avaliação das profundidades carbonatadas é de fundamental importância para as análises de durabilidade dos concretos, pois a carbonatação tem influência direta no processo de corrosão das armaduras, podendo, por meio dos resultados dessas avaliações, oferecer subsídios para tomada de decisões quanto à profundidade e qualidade dos cobrimentos dos concretos estudados. O monitoramento do ganho de massa foi executado para verificar se

existe uma correlação entre profundidade carbonatada e ganho de massa, podendo vir a ser mais uma ferramenta de acompanhamento e determinação do processo de carbonatação. Espera-se com essas avaliações, determinar uma curva de comportamento do avanço da frente de carbonatação ao longo do tempo para os concretos estudados.

A seguir, são apresentadas considerações sobre o processo de carbonatação acelerada adotado neste trabalho, bem como sobre os procedimentos de medida da frente de carbonatação e de ganho de massa dos corpos de prova.

4.6.3.1 Processo de carbonatação acelerada

O processo de carbonatação natural é lento e demanda um período longo para a avaliação do avanço da frente de carbonatação. Para este estudo, optou-se, portanto, por um procedimento de carbonatação acelerada, utilizando-se para tanto uma incubadora de CO₂ da marca Caron, modelo 6034-1, com controles internos de temperatura, umidade relativa e teor de CO₂. Essa incubadora ou câmara de carbonatação era totalmente automatizada, tendo precisão de 0,1°C para a temperatura, 1% para a umidade relativa e 0,1% para o teor de CO₂. Neste experimento, o processo de indução acelerada de carbonatação consistiu na submissão dos corpos de prova no ambiente interno da câmara de carbonatação (incubadora de CO₂), pelos períodos previstos (comentados anteriormente), cujos parâmetros adotados da câmara foram os seguintes: concentração de CO₂ igual a 6%, umidade igual a (75±2)% e temperatura igual a (20±1)°C.

Na Figura 4.14, pode-se verificar a disposição dos corpos de prova de concreto e argamassa dentro da incubadora de CO₂, e na Figura 4.15 tem-se uma vista da incubadora utilizada e do detalhe do painel de controle digital, que controla os parâmetros internos da incubadora.

Figura 4.14- Disposição dos corpos de prova dentro da incubadora de CO₂.Figura 4.15- Detalhes: a) Incubadora de CO₂ e b) Painel de controle.

4.6.3.2 Determinação da profundidade carbonatada

Por ser um processo eficiente, prático e de baixo custo, além de ser utilizado por diversos pesquisadores para a determinação da profundidade carbonatada, optou-senesta pesquisa, pelo indicador químico de pH para mensurar o avanço da frente de carbonatação. A técnica consistiu na aspersão do indicador em região recém cortada do concreto, realizada antes que a face exposta pelo corte viesse a se carbonatar ao reagir com o CO₂ do ar. A reação de contato da solução com o concreto evidenciou a região não carbonatada, onde o pH é muito alcalino, ocorrendo a coloração típica do indicador, diferenciando-a da região carbonatada que resultou em aspecto incolor.

O processo de verificação da frente de carbonatação de todos os corpos de prova consistiu no corte ao meio no sentido dos 5 cm, obtendo-se então duas fatias de concreto de

10 cm x 10 cm x 2,5 cm, corte este feito por meio de cortadeira elétrica com disco diamantado refrigerado com água, expondo assim as partes internas do corpodeprova, conforme mostrado na Figura 4.16 a). Uma correlação das medidas de carbonatação com o corte executado como mencionado anteriormente e de um corte por fragmentação a seco foi realizada por Ferreira (2013), que não identificou diferenças significativas entre os dois processos de abertura dos corpos de prova. Por esta razão, adotou-se o corte por meio de cortadeira elétrica com refrigeração à água, dada a sua praticidade. Em seguida ao corte, após a secagem das faces, foi feita a aspersão do indicador de pH à base de fenolftaleína com auxílio de aspersor. Após repouso de aproximadamente 30 minutos, foi mensurada a profundidade de carbonatação mediante o uso de um paquímetro digital com precisão 0,01 mm, e retiradas fotos em máquina digital para posterior tratamento para mensuração da profundidade carbonatada. A tomada de leitura após 30 minutos da aspersão foi baseada em estudo feito por Castro (2003), que concluiu não haver diferença entre as medidas realizadas com leitura em curto prazo (logo após a aspersão) e conforme o tempo de espera preconizado pela recomendação CPC-18 (RILEM, 1988), que prevê a leitura somente após 24 horas da aspersão.

Na Figura 4.16 b) é mostrado o momento da aspersão do indicador de pH (fenolftaleína).

Figura 4.16- a) Corte das amostras com cortadeira elétrica e b) momento da aspersão da fenolftaleína.



O indicador de pH utilizado foi uma solução de fenolftaleína a 1%, obtida por meio da dissolução de 10g do reagente em 700 cm³ de etanol e diluída em 300 cm³ de água destilada, possui coloração que vai do incolor (zona carbonatada) ao vermelho carmim (zona não carbonatada), com faixa de viragem entre 8,3 e 10,0 (valor do pH). Essa solução foi utilizada por apresentar maior contraste facilitando a identificação da frente carbonatada e também baseado em estudos realizados por Kazmierczak (1995), que procedeu a uma correlação entre os resultados de profundidade carbonatada obtidos pelos

indicadores de pH timolftaleína e fenolftaleína, e Castro (2003), que fez a mesma correlação entre a fenolftaleína e amarelo de alizarina. Ambos chegaram a conclusões convergentes, que apontam para relações bastante significativas entre as leituras dos indicadores utilizados, e que as diferenças de profundidade detectadas entre eles, são proporcionais e determinadas pela zona de viragem de cada indicador, ou seja, indicadores com zona de viragem mais alta detectam profundidades carbonatadas maiores. Nas Figuras 4.18 e 4.19 é possível verificar o contraste do indicador após 30 minutos da aspersão, para todos os concretos com 9 e 16 semanas de carbonatação acelerada, prontos para as medidas de profundidade carbonatada.

Figura 4.17- Corposdeprova aspergidos com 09 semanas de carbonatação acelerada.

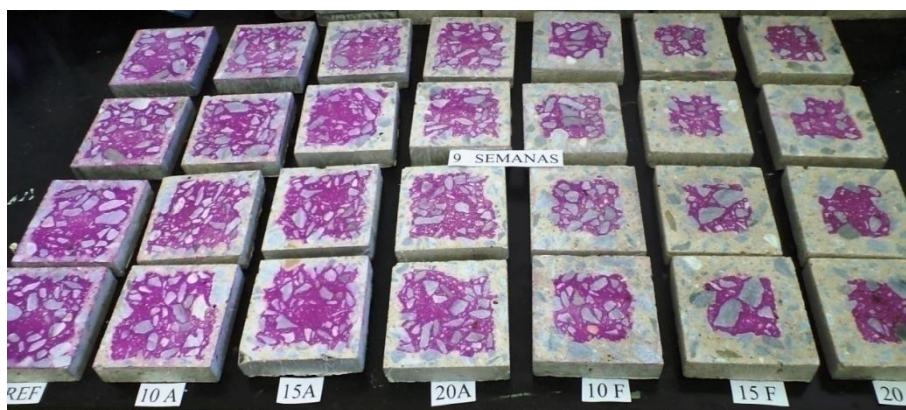
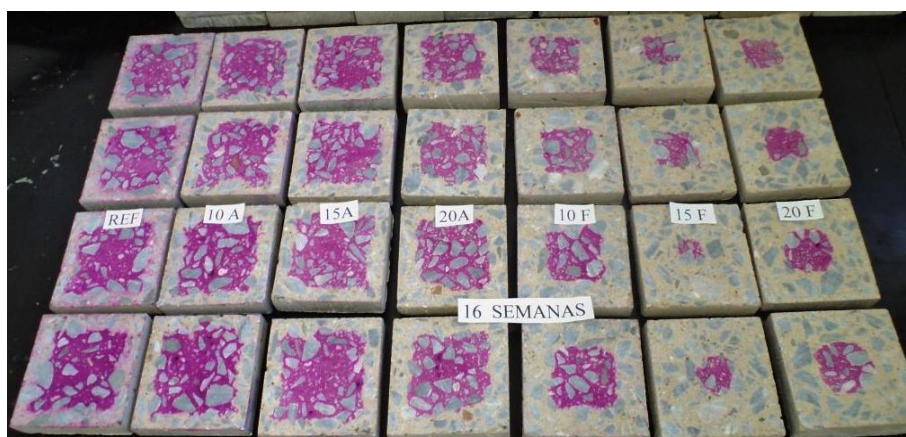


Figura 4.18- Corposdeprova aspergidos com 16 semanas de carbonatação acelerada.



Para se determinar as medidas de profundidades carbonatadas, foram utilizadas duas técnicas: a primeira, com a utilização de um paquímetro digital da marca Mitutoyo com precisão de 0,01 mm e a segunda, com ajuda de programa computacional. Nas duas técnicas utilizadas tomou-se o cuidado de não considerar as regiões que continham os agregados delimitando as zonas carbonatadas e não carbonatadas, pois estes não se

carbonatam e não se alteram com o indicador de pH, dessa maneira desconsiderou-se a região contendo parte do agregado e considerou-se uma linha imaginária por cima dos mesmos, de forma a continuar a tendência de coloração entre as suas duas extremidades. Na primeira técnica, com o paquímetro digital, foram realizadas três medidas representativas de cada uma das faces laterais, totalizando 12 medidas em cada um dos dois corpos de prova. Procedeu-se, então, ao cálculo de uma média aritmética simples das 12 leituras, para cada corpo de prova, obtendo-se ao final uma média geral dos dois corpos de prova utilizados, tendo-se assim, representativo cada concreto do experimento, um resultado de média global de 24 medidas (com dois corpos de prova). Na Figura 4.19 é mostrado o equipamento utilizado e a mensuração da profundidade de carbonatação.

Figura 4.19- Medida da profundidade carbonatada por meio de paquímetro digital.



No processo de medida de profundidade carbonatada por meio de programa computacional, que foi utilizado por alguns pesquisadores (KULAKOWSKI, 2002; DALLA LANA, 2005; HOPPE FILHO, 2008; PAULETTI, 2009; FERREIRA, 2013), todas as amostras cortadas e aspergidas com fenolftaleína foram fotografadas com uma câmera fotográfica digital. As medidas de profundidade de carbonatação foram realizadas nas imagens digitais, com o auxílio do programa computacional AutoCAD, versão 2012. As imagens foram acompanhadas de uma escala, o que permitiu a calibração dos recursos utilizados.

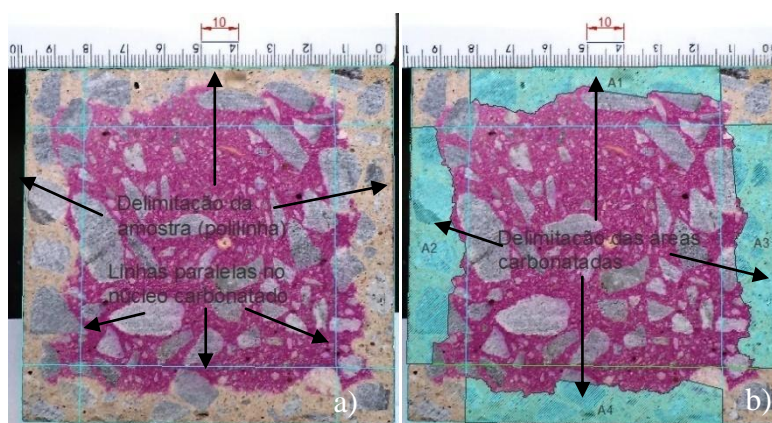
As etapas para a realização das medidas de cada imagem foram as seguintes:

- a) abertura da imagem no programa AutoCAD;
- b) ajuste dimensional da imagem de acordo com a escala que a acompanha;

- c) sobreposição de uma polilinha (linha poligonal contínua) delimitando as arestas da imagem do corpodeprova;
- d) criação de linha paralela à polilinha delimitando a área carbonatada, seguindo os critérios de eliminar os cantos da amostra por onde o CO_2 penetra em duas direções, e de modo que o polígono formado no centro da amostra compreenda apenas uma área não carbonatada, a qual seja a maior possível;
- e) criação de uma nova linha poligonal fechada acompanhando o limite da área carbonatada e não carbonatada, delimitada pelas linhas paralelas e polilinha da aresta;
- f) cálculo da área da poligonal criada e medida da distância da linha da aresta com ferramentas do programa AutoCAD e, por fim, cálculo da profundidade média carbonatada, por meio da divisão da área obtida pela distância medida da aresta.

Na Figura 4.20, podem ser vistas, por meio de programa computacional, as imagens das amostras e as etapas para o cálculo da profundidade carbonatada, onde são mostradas: em a), a delimitação da amostra por meio de polilinha e de linhas paralelas delimitando o núcleo não carbonatado; e em b), a delimitação e o cálculo das áreas carbonatadas nas quatro faces da amostra.

Figura 4.20- Etapas do cálculo da profundidade carbonatada por meio de programa computacional.



Na análise dos resultados foram utilizadas as profundidades médias de carbonatação das quatro laterais de cada corpo de prova. Como foram duas amostras no total por situação, e em cada uma delas se obtiveram quatro resultados, foram então totalizados oito resultados para cada mistura, em cada idade de medição.

4.6.3.3 Determinação do ganho de massa

Para se determinar a massa adquirida em cada corpo de prova de cada tipo de concreto estudado, as amostras foram todas pesadas logo após o condicionamento, antes da entrada na incubadora de CO₂(para o regime de carbonatação acelerada) e depois de cada uma das idades estudadas de 1, 3, 6, 9, 12 e 16 semanas. Fez-se, então, a subtração da massa final pós carbonatação, em cada uma das idades de ataque, pela massa inicial obtida antes da entrada na câmara de carbonatação, chegando-se a um valor de ganho de massa em relação à massa inicial e calculando-se sempre uma média dos dois corpos de prova. Para mensuração das massas, foi utilizada uma balança de precisão da marca Shimadzu, modelo BX32KH, com precisão de 0,1 g.

4.6.3.4 Determinação do coeficiente de carbonatação

O coeficiente de carbonatação acelerada “k”, que expressa a velocidade da frente de carbonatação, foi calculado para se estimar a vida útil de projeto das estruturas para os concretos estudados, e foi determinado utilizando a expressão clássica da carbonatação, baseada na 1ª lei de difusão de Fick, dada pela equação 4.1.

$$e_c = e_{co} + k \sqrt{t} \quad (4.1)$$

Onde:

e_c = espessura ou profundidade de carbonatação (mm);

e_{co} = espessura ou profundidade de carbonatação no início do processo da carbonatação acelerada (mm);

k = coeficiente de carbonatação acelerada (mm/ \sqrt{t} semana);

t = tempo de exposição (semanas).

Para esse estudo adotamos o e_{co} como sendo zero (0), ou seja, antes de entrar na incubadora de CO₂ não aconteceu nenhum processo de carbonatação natural ou, se aconteceu, foi considerado desprezível, devido a todos os cuidados tomados desde a desmoldagem até a entrada das amostras no regime de carbonatação acelerada

4.6.4 Caracterização mineralógica e avaliação da microestrutura e porosidade das amostras de argamassa dos concretos

Foram realizados ensaios de difração de raios X, análise termogravimétrica, microscopia eletrônica de varredura e porosimetria por intrusão de mercúrio, todos em amostras de argamassa carbonatadas e não carbonatadas.

Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura foram executados no laboratório multiusuário de microscopia de alta resolução (LABMIC), da Universidade Federal de Goiás (UFG), e as análises termogravimétricas foram realizadas no laboratório de materiais da central analítica do Instituto de Química da UFG. Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram realizados na Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), em São Leopoldo-RS, e os ensaios de difração de raios X ocorreram nos laboratórios da empresa Eletrobras FURNAS, em Aparecida de Goiânia-GO.

A extração de amostras não carbonatadas para esses ensaios citados foi realizada após o término do processo de cura, onde os corpos de prova de argamassa de 40 mm x 40 mm x 160 mm foram fraturados em quatro partes e levados à estufa para secagem entre 72 horas e 96 horas, a uma temperatura de 50°C, temperatura esta que foi definida para se evitar a fissuração superficial e, também, para evitar a potencialização de reações químicas que poderiam ocorrer em temperaturas mais elevadas; após a secagem, as amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos fechados e selados com filme de PVC, na presença de sílica gel e cal sodada, de modo a evitar a hidratação e a carbonatação natural em ambiente de laboratório. As amostras permaneceram em ambiente de laboratório até a realização dos ensaios.

Após a cura de 125 dias por imersão, os corpos de prova de argamassa com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm foram condicionados de acordo com o TC 116-PCD (RILEM, 1999) e, após o condicionamento, entraram no regime de carbonatação acelerada em incubadora de CO₂, em condições controladas de 6% de concentração de CO₂, de (75±2)% de umidade e de (20±1)°C de temperatura.

Para as amostras carbonatadas, os ensaios foram realizados após 12 semanas de exposição ao CO₂. Os corpos de prova foram fraturados e as partes internas que não haviam sofrido o processo de carbonatação foram removidas por meio de cortadeira de precisão e em

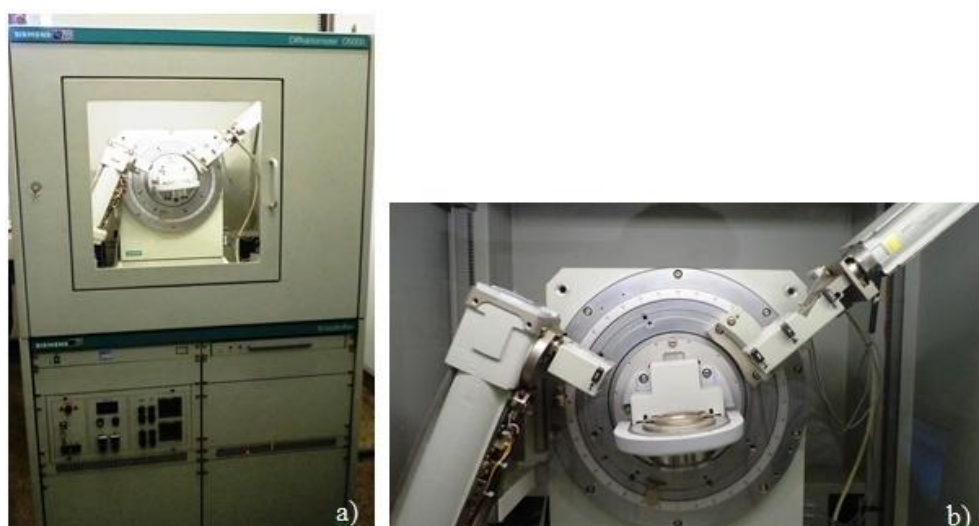
seguida descartadas. O material restante foi levado à estufa, permanecendo por 96 horas, com temperatura de 50°C. Depois de secas, essas amostras foram acondicionadas em pequenos sacos plásticos selados e na presença de sílica gel, para se evitar a sua hidratação.

4.6.4.1 Difração de raios X (DRX)

O ensaio de difração de raios X objetivou identificar produtos cristalinos formados nas argamassas com e sem o metacaulim ao final do processo de cura e antes do processo de carbonatação e, também, identificar qualitativamente a presença do hidróxido de cálcio remanescente após as reações pozolânicas. Nas argamassas carbonatadas, o objetivo foi identificar produtos cristalinos formados, bem como verificar qualitativamente as presenças de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio.

As análises de difração de raios X foram realizadas por meio do difratômetro de raios X, marca Siemens, modelo D5000, que faz uso de um filamento de tungstênio para geração dos elétrons, apenas com as radiações $K\alpha$, sendo a varredura de 2θ variando de 3° a 70° e resolução de 0,02°. Foram utilizadas instruções técnicas internas de FURNAS para a preparação (IT.DCT.CA.123) e análise das amostras (IT.DCT.CA.121). Na Figura 4.21 é mostrado o equipamento utilizado para os ensaios.

Figura 4.21- Fotografias do difratômetro de raios X onde se têm em a) uma vista geral externa do equipamento e em b) uma vista interna com detalhe do porta-amostras.



4.6.4.2 Análise termogravimétrica (ATG)

Nessas análises foram utilizadas amostras de argamassas carbonatadas e não carbonatadas, com o objetivo de identificar o consumo do hidróxido de cálcio e a formação do carbonato de cálcio em argamassas carbonatadas, verificando a temperatura em que ocorre a decomposição desses produtos. Esta análise também visou identificar compostos formados após a carbonatação acelerada.

Para a análise de termogravimetria, uma porção de 15g foi moída e peneirada em malha com abertura de 75 μm , e o material passante utilizado. O equipamento utilizado foi uma termobalança da marca Shimadzu, modelo DTG-60H, com atmosfera de ar com fluxo de 50 ml/min, submetendo a amostra a um gradiente térmico de 900°C, com taxa de aquecimento de 10°C por minuto. Na Figura 4.22 é mostrado o equipamento utilizado nos ensaios, onde: em a), é mostrada uma vista geral do equipamento; e em b), tem-se um detalhe com as características do equipamento.

Figura 4.22- Termobalança utilizada nas análises termogravimétricas.



4.6.4.3 Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)

Amostras de argamassa não carbonatadas e carbonatadas foram submetidas à porosimetria por intrusão de mercúrio, com o objetivo de verificar possíveis diferenças na distribuição do tamanho de poros e na porosidade total entre as amostras com diferentes teores de adição de metacaulim, e também visando avaliar a influência da carbonatação nesses sistemas de poros das várias argamassas estudadas.

Para a execução dos ensaios, foi utilizado o equipamento PoremasterQuantachrome Corporation, com ângulo de contato de 140° e velocidade de intrusão de 500 mm Hg/min.

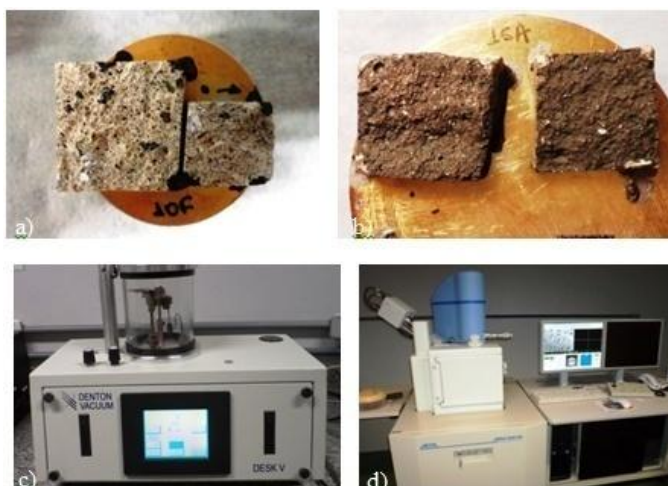
Na preparação das amostras, adotou-se o procedimento interno empregado na UNISINOS, com secagem prévia em estufa. Após, as amostras foram submetidas às câmaras de baixa e alta pressão do equipamento para determinação do volume de mercúrio intrudido.

4.6.4.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Nessas análises, foram utilizadas amostras fraturadas de argamassas carbonatadas e não carbonatadas, com o objetivo de verificar as alterações microestruturais em decorrência da adição de metacaulim e a morfologia dos produtos resultantes das reações pozolânicas e de carbonatação. Também foi objetivo dessas análises, observar diferenças de densificação na estrutura dos poros de cada argamassa estudada. Nas argamassas não carbonatadas, foram analisados o centro (núcleo) das amostras e também as faces externas, com o intuito de verificar se houve impregnação do hidróxido de cálcio próximo às faces, devido ao fato de ter sido utilizada água saturada com cal hidratada no processo de cura submersa.

O equipamento utilizado para obtenção das imagens e espectros de análise química foi um microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL, modelo JSM-6610, equipado com EDS, com capacidade de ampliação de imagens em até 150 000 vezes; porém, devido aos tipos de amostras (argamassas) e ao fato de se trabalhar com amostras fraturadas (não polidas), essa capacidade ficou limitada a aproximadamente 50 000 vezes, com razoável definição. Na Figura 4.23, são apresentadas as etapas para a obtenção de imagens no MEV.

Figura 4.23- Etapas para obtenção de imagens no microscópio eletrônico de varredura, onde se tem: em a), amostras no porta-amostras com aplicação de tinta grafite para contato com a metalização em ouro; em b), amostras metalizadas com ouro prontas para as análises no MEV; em c), detalhe do equipamento para metalização a vácuo; e em d), o microscópio eletrônico de varredura.



CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e as discussões relativas aos ensaios realizados no programa experimental. Inicialmente são discutidos os resultados de caracterização do concreto endurecido e os relativos ao estudo de carbonatação acelerada. Em seguida são apresentados os resultados dos ensaios de difração de raios X, porosimetria por intrusão de mercúrio, termogravimetria e microscopia eletrônica de varredura, verificando as principais características das argamassas dos concretos, antes e após o processo de carbonatação acelerada.

5.1 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO ENDURECIDO

São apresentados neste item os resultados de resistência à compressão e a absorção de água por imersão dos concretos com os diversos níveis de substituição contemplados nesse estudo.

5.1.1 Resistência à compressão

Neste subitem são apresentados os resultados de resistência à compressão.

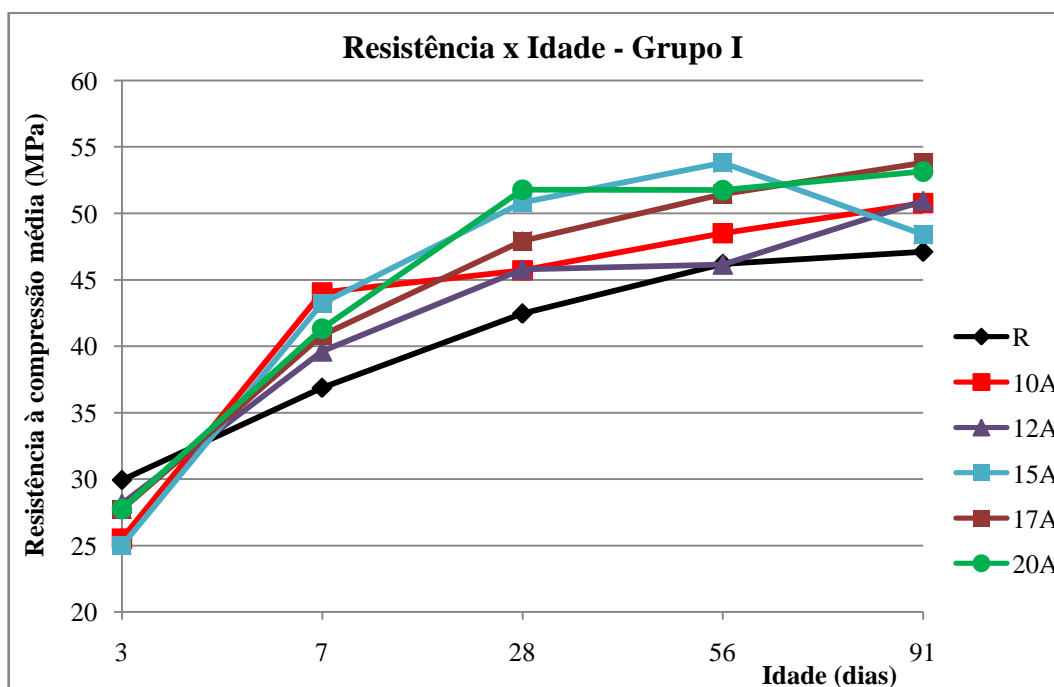
Na Tabela 5.1, apresenta-se a evolução dos valores médios de resistência à compressão para as idades de 3, 7, 28, 56 e 91 dias, considerando os tipos de concretos estudados no trabalho experimental. Também foram determinadas as classes de resistência, de acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2011) considerando um desvio padrão de dosagem (sd) igual a 4 MPa, de acordo com a condição de preparo “A” da NBR 12 655 (2006), para as idades de 28 e 91 dias. Os resultados individuais estão apresentados nas Tabelas B.1 a B.5 do apêndice B.

Tabela 5.1- Dados das resistências médias e classes de resistência dos concretos.

Tipo de Concreto		R	10A	12A	15A	17A	20A	10F	15F	20F
Resistência à compressão média (MPa) NBR 5739-2007	3 dias	29,9	25,5	28,1	25,0	27,7	27,7	22,8	18,9	17,1
	7 dias	36,9	44,0	39,6	43,2	40,8	41,3	31,4	24,5	27,1
	28 dias	42,4	45,7	45,8	50,8	47,9	51,8	35,7	27,4	30,2
	56 dias	46,2	48,5	46,2	53,8	51,4	51,7	38,5	31,7	31,6
	91 dias	47,1	50,8	50,9	48,4	53,8	53,1	36,5	31,9	34,8
Grupos de classe de resistência – 28 dias		C35	C40	C40	C45	C40	C45	C30	C20	C25
Grupos de classe de resistência – 91 dias		C40	C45	C45	C40	C45	C45	C30	C25	C30

Nas Figuras 5.1 e 5.2 são mostradas as evoluções das resistências médias à compressão em relação ao tempo de cura de cada concreto, onde, nas abscissas estão colocadas as idades de rompimento dos corpos de prova e nas ordenadas os valores obtidos de resistência à compressão média.

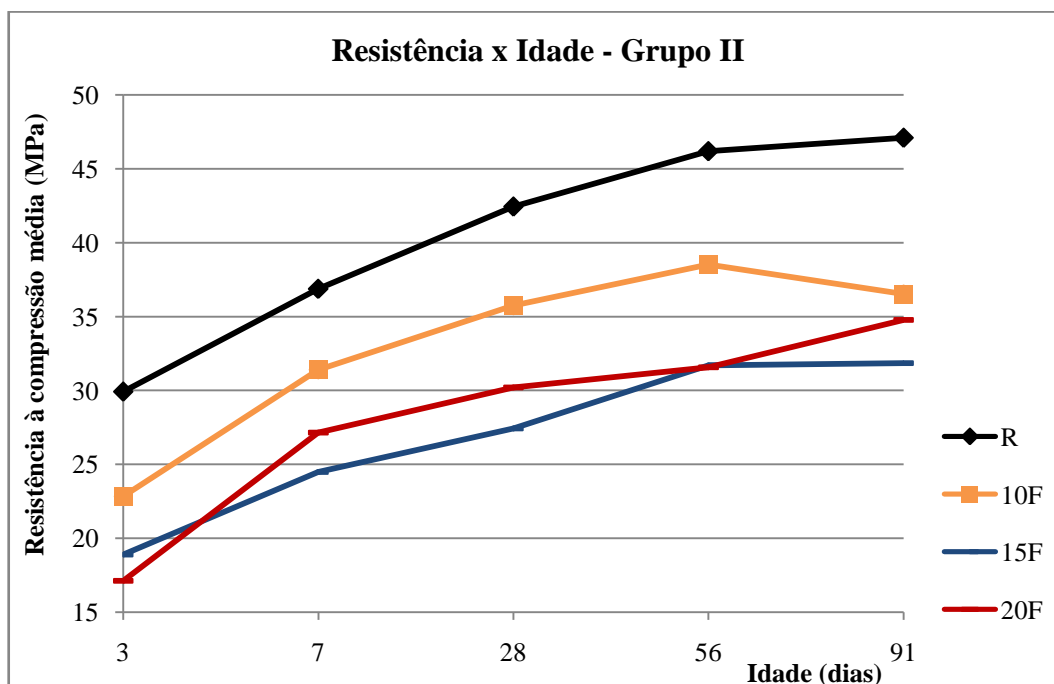
Figura 5.1- Gráfico da resistência média à compressão x idade para os concretos do grupo I.



Observa-se no gráfico da Figura 5.1, que as resistências à compressão dos concretos do primeiro grupo na idade de três dias ficaram abaixo da resistência do concreto de referência, porém, já no sétimo dia, essas resistências superaram a do concreto de

referência e permaneceram em níveis mais elevados até o nonagésimo primeiro dia, que foi a última idade de análise. Observa-se, também, que o concreto com 15% de substituição (15A) teve um decréscimo de resistência entre as idades de 56 e 91 dias, o que poderia ser explicado por algum problema durante a moldagem ou no ensaio de resistência à compressão dos corposdeprova, uma vez que não há respaldo científico para esse comportamento.

Figura 5.2- Gráfico da resistência média à compressão x idade para os concretos do grupo II.



Nesse gráfico da Figura 5.2, nota-se que os concretos do segundo grupo não atingiram a resistência ou classe de resistência projetada, apesar de terem sido realizados estudos criteriosos para a determinação da relação a/ag , afim de compará-los em igualdade de condições de resistência ao concreto de referência. Também no concreto com 10% de substituição (10F) do segundo grupo foi detectado um decréscimo de resistência entre as idades de 56 e 91 dias, como no 15A do primeiro grupo, porém em menores proporções, que certamente, tiveram as mesmas causas consideradas no concreto do primeiro grupo.

Tendo em vista o comportamento incoerente ocorrido nos concretos 15A e 10F na idade de 91 dias, com redução de resistência em comparação à idade de 56 dias, optou-se por expressar o ganho de resistência mecânica desses concretos somente até os 56 dias de idade. Suspeita-se ter havido algum problema na moldagem ou no ensaio de resistência à compressão para a idade de 91 dias, que tiveram suas resistências reduzidas.

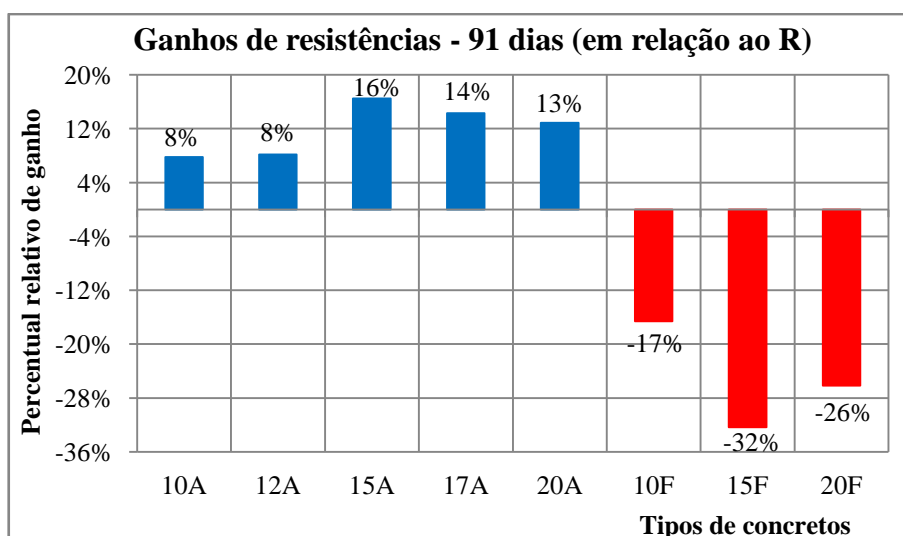
Na Tabela 5.2 estão calculados os ganhos percentuais de resistência, onde na penúltima coluna os valores obtidos são relativos ao ganho de resistência entre o terceiro e o nonagésimo primeiro dia, e na última coluna, como também na Figura 5.3, estão os ganhos percentuais em relação ao concreto de referência para a idade de 91 dias, excessão se faz para os concretos 15A e 10F que foram consideradas as suas resistências para a idade de 56 dias.

Tabela 5.2- Dados relativos de ganhos de resistência dos concretos.

Grupos	Tipos de Concretos	Resistência à compressão (MPa)			Ganho de resistência	Ganho em relação ao R
		03 dias	56 dias	91 dias	03 aos 91 dias	91 dias
	R	29,9	46,2	47,1	57%	0%
Grupo I	10A	25,5	-	50,8	99%	8%
	12A	28,1	-	50,9	81%	8%
	15A	25,0	53,8	48,4	115%*	16%*
	17A	27,7	-	53,8	94%	14%
	20A	27,7	-	53,1	92%	13%
Grupo II	10F	22,8	38,5	36,5	69%*	-17%*
	15F	18,9	-	31,9	69%	-32%
	20F	17,1	-	34,8	103%	-26%

*foram desconsideradas, para o cálculo, as resistências aos 91 dias e utilizadas as de 56 dias.

Figura 5.3- Ganhos de resistência em relação ao concreto de referência aos 91 dias.



5.1.1.1 Algumas considerações sobre a resistência à compressão

Com base nos resultados obtidos durante o programa experimental e pelas análises dos gráficos e tabelas, apresentam-se algumas considerações em relação à resistência à compressão.

Aos três dias de idade, todos os concretos apresentaram resistências menores do que o concreto de referência, o que sugere que a velocidade de hidratação dos compostos anidros do cimento é um fator preponderante para o ganho de resistência nas primeiras idades. Esse efeito se sobrepõe ao efeito microfíler característico dos concretos com adição, que nada mais é do que a ocupação dos vazios deixados pelos grãos maiores do cimento, por parte das partículas menores do metacaulim, o que também leva a uma melhora na resistência pela densificação do concreto.

Entre o terceiro e o sétimo dias percebe-se de forma clara, mais acentuadamente nos concretos do primeiro grupo, uma maior velocidade nos ganhos de resistência, que pode ser justificado pelas reações pozolânicas ocorridas (menos provável) e pelo efeito microfíler, que leva o concreto a criar pontos de nucleação com a formação de pequenos cristais devido aos menores espaços disponíveis para os produtos de hidratação, ocasionando maior velocidade nas reações de hidratação e aumentando as resistências mais rapidamente. A esse respeito, Tutikian, Isaia e Helene (2011) lembram que o tamanho reduzido das partículas da adição permite que as reações ocorram rapidamente, além de quebrarem a inércia do sistema, agindo por ação de nucleação das partículas de cimento e fazendo com que estas se hidratem de forma mais rápida e completa.

A partir do sétimo dia percebe-se que as velocidades nos ganhos de resistência são minoradas, e de maneira lenta e gradual as reações pozolânicas começam a acontecer com mais intensidade e vão até os 91 dias considerados nessa pesquisa. Analisando a Tabela 5.2, verifica-se que os concretos do primeiro grupo obtiveram ganhos percentuais de resistência acima de 8% em relação ao referência (R), justificados pelas reações pozolânicas proporcionadas pela adição do metacaulim e também pelo efeito fíler.

Nos concretos do segundo grupo, que possuem níveis mais baixos de resistência que os concretos do primeiro grupo, analisando o gráfico da Figura 5.2 e os dados da Tabela 5.2, percebe-se que o comportamento seguiu a mesma tendência dos concretos do primeiro grupo, ou seja, maior velocidade nos ganhos de resistência entre o terceiro e o sétimo dias

e ganhos percentuais de resistência maiores que o concreto de referência quando comparados os resultados dos 3 aos 91 dias (penúltima coluna da Tabela 5.2), o que também se atribui às reações pozolânicas ocorridas ao longo desse período.

Considerando os níveis de substituição e materiais utilizados na pesquisa, foi possível constatar também que a relação a/ag tem grande influência no ganho de resistência nos concretos com adição de metacaulim, como observado no gráfico da Figura 5.3 para os concretos do segundo grupo e na Tabela 5.2 para os concretos 15F e 20F que obtiveram os menores percentuais de ganho de resistência comparáveis ao concreto de referência (R).

5.1.2 Absorção de água por imersão

Neste subitem estão apresentados os resultados de absorção de água por imersão, o índice de vazios e massa específica de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009).

Na Tabela 5.3 estão apresentados os valores obtidos no final do processo de cura, aos 91 dias, para cada situação estudada no trabalho experimental, com exceção dos concretos 12A e 17A que não foram avaliados em relação ao processo de carbonatação. Os resultados individuais estão apresentados na Tabela B.6 do apêndice B.

Tabela 5.3- Dados de absorção por imersão, índice de vazios e massa específica.

Tipo de Concreto	R	10A	15A	20A	10F	15F	20F
Absorção por imersão - 91 dias (%) NBR 9778 : 2009	6,92	6,79	6,46	7,07	7,28	8,14	7,49
Índice de vazios - 91 dias(%) NBR 9778 : 2009	15,55	15,36	15,08	15,91	16,12	17,64	16,44
Massa específica - 91 dias(kg/dm ³) NBR 9778 : 2009	2,68	2,67	2,68	2,67	2,64	2,63	2,62

O CEB-192 (1989) propõe critérios para avaliação da qualidade do concreto baseados na taxa de absorção de água por imersão que são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4- Critérios de avaliação da absorção de água do concreto, segundo o CEB-192 (1989).

Absorção (%)	Absorção do concreto	Qualidade do concreto
<3,0	Baixa	Boa
3,0 a 5,0	Média	Média
> 5,0	Alta	Pobre

O ensaio de absorção total de água por imersão permite obter uma estimativa do volume total de poros no concreto, porém, este não reproduz com precisão a permeabilidade do concreto, parâmetro importante na avaliação da durabilidade do material. A este respeito Shutter e Audenaert (2004), baseados em resultados experimentais obtidos em vinte e duas (22) amostras de concretos de diferentes composições, relataram que a determinação do volume de poros permeáveis por meio do ensaio de absorção de água por imersão não é um parâmetro confiável para a estimativa de durabilidade do concreto, particularmente nos processos de carbonatação e ou penetração de cloretos.

Baseados na proposição do CEB, Tabela 5.4, todos os resultados obtidos estão classificados na faixa de alta absorção e de qualidade pobre. Ao se analisarem esses valores de absorção em relação à resistência à compressão, conclui-se que não se tem uma correlação direta entre esses parâmetros e, portanto, não seria prudente classificar esses concretos baseados na absorção total de água por imersão e, tampouco, dizer que a resistência à compressão do concreto define a sua qualidade no que tange à durabilidade, ou seja, o parâmetro resistência não garante, por si só, a durabilidade dos concretos.

Contudo, uma observação é possível de tirar, qual seja, a de que há uma tendência de aumento da absorção e do índice de vazios consoante com o aumento da relação a/ag. No caso em questão, quando a relação a/ag se afasta do valor referencial igual a 0,60, os valores de absorção e índice de vazios aumentam significativamente (2 últimas colunas da Tabela 5.3). Quanto à variação da absorção consoante à incorporação de metacaulim, na mesma relação a/ag, percebe-se que é discreta a redução desse percentual (inclusive com 20% de metacaulim há um aumento da absorção e do índice de vazios), o que indica não ser significativa a interferência do metacaulim nessa propriedade, para essa faixa de resistência típica dos concretos usuais de mercado.

5.2 CARBONATAÇÃO ACELERADA DO CONCRETO

Neste item são apresentados os ganhos de massa, as profundidades carbonatadas segundo a recomendação CPC-18 (RILEM, 1988), com adaptações como o tipo de fratura das amostras e o intervalo entre a aspersão e a leitura, conforme comentado no subitem 4.6.3.2 do capítulo anterior.

5.2.1 Profundidade carbonatada e ganho de massa

Nos concretos endurecidos carbonatados foram avaliadas as profundidades carbonatadas médias, obtidas por meio de paquímetro e de técnica computacional com análise de imagens digitais, e os ganhos de massa. Na Tabela 5.5, estão apresentados todos os valores obtidos para as idades de 1, 3, 6, 9, 12 e 16 semanas. Os valores do coeficiente de carbonatação acelerada (k) foram obtidos segundo a Equação 4.1 e análise gráfica.

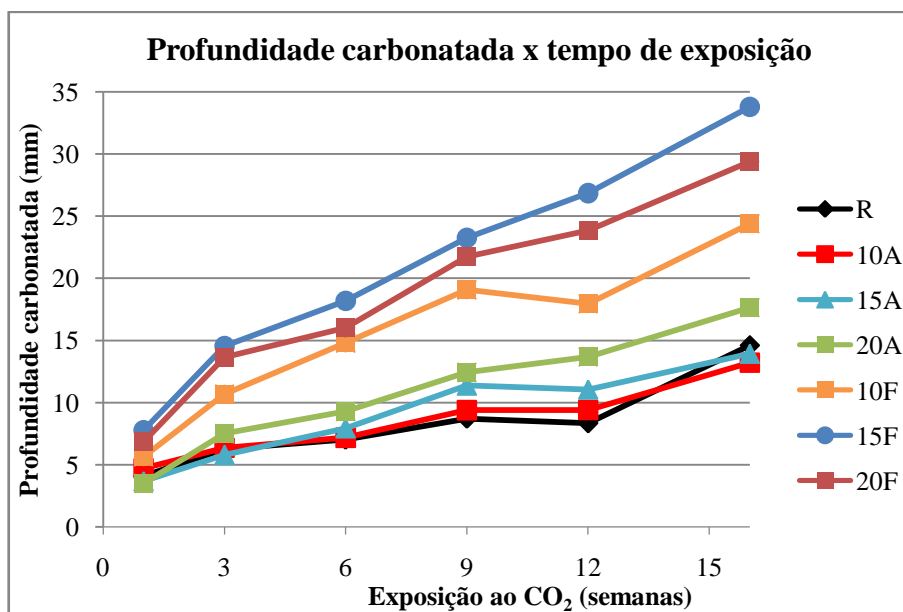
Tabela 5.5- Profundidade carbonatada média, ganho de massa e coeficiente de carbonatação.

Profundidade carbonatada - Ganho de massa e Coeficiente de carbonatação								
Tipo de Concreto	Semanas em exposição ao CO ₂	1	3	6	9	12	16	k - Coeficiente de carbonatação (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$)
	$\sqrt{\text{semana}}$	1,0	1,7	2,4	3,0	3,5	4,0	
R	Prof. Carbon. (mm)	4,1	6,3	7,0	8,7	8,3	14,6	3,10
	Ganho de massa (g)	10,4	16,1	17,8	18,5	22,0	26,7	
10A	Prof. Carbon. (mm)	4,7	6,4	7,2	9,4	9,4	13,2	3,12
	Ganho de massa (g)	9,6	13,9	16,2	19,4	18,8	23,8	
15A	Prof. Carbon. (mm)	3,7	5,8	7,9	11,4	11,1	13,9	3,43
	Ganho de massa (g)	8,0	13,3	15,1	18,5	20,4	21,2	
20A	Prof. Carbon. (mm)	3,5	7,5	9,3	12,4	13,7	17,6	4,14
	Ganho de massa (g)	10,9	15,3	21,3	22,5	26,0	28,8	
10F	Prof. Carbon. (mm)	5,6	10,7	14,8	19,1	17,9	24,4	5,90
	Ganho de massa (g)	11,3	16,4	21,0	24,0	24,7	26,6	
15F	Prof. Carbon. (mm)	7,8	14,5	18,2	23,3	26,9	33,8	7,99
	Ganho de massa (g)	13,0	18,6	22,3	23,6	26,0	26,3	
20F	Prof. Carbon. (mm)	6,9	13,7	16,0	21,7	23,8	29,4	7,13
	Ganho de massa (g)	12,1	18,0	20,4	22,0	25,5	25,2	

Os resultados individuais de profundidades carbonatadas obtidas por meio de programa computacional estão apresentados nas Tabelas C.1 e C.2; os dados de profundidades carbonatadas médias, com as duas técnicas utilizadas, e os ganhos de massa estão na Tabela C.3; e os gráficos para determinação do coeficiente de carbonatação acelerada (k) por meio das curvas de tendência (ajuste dos pontos experimentais por regressão linear) estão na Figura C.1, todos constantes no apêndice C.

Na Figura 5.4, tem-se um gráfico onde é mostrada a evolução da profundidade carbonatada em relação ao tempo de exposição em incubadora, em condições controladas, de umidade relativa, de temperatura e de CO_2 .

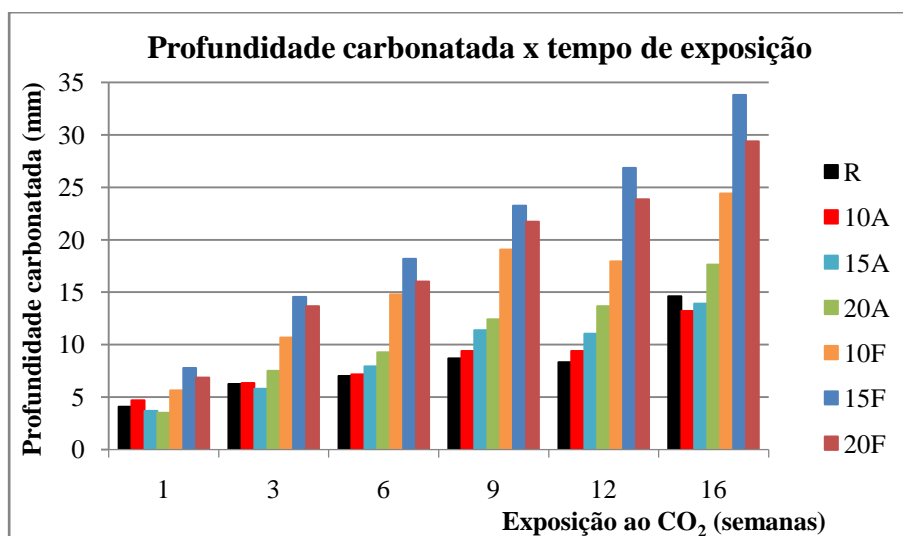
Figura 5.4- Evolução da profundidade carbonatada pelo tempo de exposição.



Nota-se, pelo gráfico, que a carbonatação tem uma taxa mais acentuada nas três primeiras semanas e que aos poucos a velocidade do avanço da frente vai diminuindo, o que era de se esperar, devido à formação do carbonato de cálcio, que colmata e refina a porosidade aberta do concreto em exposição ao CO_2 , dificultando a sua difusão. Percebe-se, também, que entre a 9ª e a 12ª semanas de exposição houve uma tendência de estabilização entre os concretos estudados, com exceção dos concretos 20A do primeiro grupo e, 15F e 20F do segundo grupo, porém, após a 12ª semana, essa tendência de estabilização não permaneceu e a frente de carbonatação continuou avançando em proporções parecidas com as das semanas anteriores.

Cabe ainda salientar-se que os concretos do primeiro grupo tiveram comportamentos bastante semelhantes com o de referência e que, ao final das 16 semanas de exposição, os concretos 10A e 15A, ou seja, com 10% e 15% de substituição e com mesma relação a/ag, apresentaram profundidades carbonatadas menores que as do concreto de referência.

Na Figura 5.5 os resultados da Figura 5.4 são apresentados em barras, para melhor compreensão e análise das profundidades carbonatadas obtidas em uma mesma idade de exposição.

Figura 5.5- Gráfico da profundidade carbonatada pelo tempo de exposição ao CO₂.

No gráfico da Figura 5.5, é observada uma significativa diferença na profundidade carbonatada entre os dois grupos de concretos estudados, onde no primeiro se percebe uma tendência semelhante na evolução da profundidade carbonatada em relação ao concreto de referência, o que não ocorre nos concretos do segundo, ficando evidenciado que a relação a/ag é um fator preponderante no processo de avanço da frente de carbonatação para os níveis de substituição e materiais utilizados na pesquisa.

Nas Figuras 5.6 e 5.7, estão apresentados graficamente os ajustes obtidos por regressão linear que melhor representam os pontos experimentais obtidos da relação entre as profundidades médias carbonatadas e a raiz quadrada do tempo de exposição ao CO₂. Estão também apresentados os coeficientes de determinação das curvas (R^2) e os valores calculados dos coeficientes de carbonatação acelerada (k), sendo as figuras, sequencialmente, referentes aos concretos dos grupos I e II.

Figura 5.6- Coeficientes de carbonatação acelerada dos concretos do grupo I.

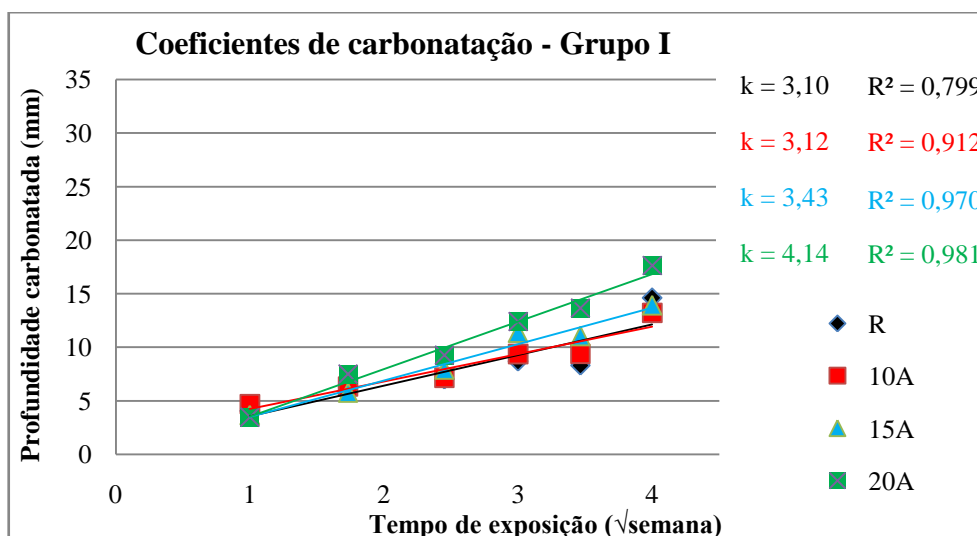
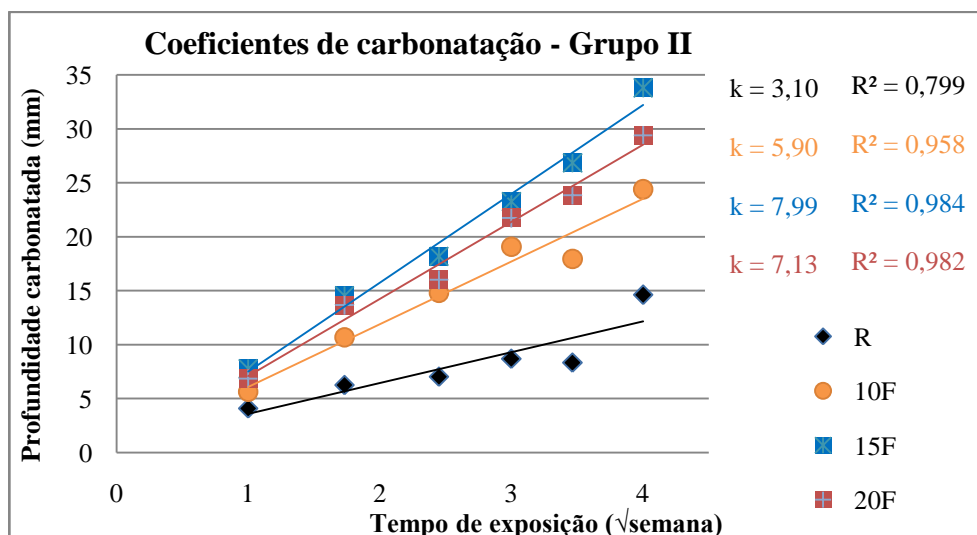


Figura 5.7- Coeficientes de carbonatação acelerada dos concretos do grupo II.



Observa-se, analisando a Tabela 5.5 e as Figuras 5.6 e 5.7, que o coeficiente de carbonatação acelerada aumenta com o aumento do teor de adição mineral. O comportamento global dos concretos do primeiro grupo foi bastante semelhante, com coeficientes bem próximos ao concreto de referência, notadamente nos tipos 10A e 15A. No segundo grupo os comportamentos foram distintos e os coeficientes tiveram expressivo aumento em relação ao concreto de referência, o que corrobora a afirmação de que a relação a/ag tem grande influência na velocidade de carbonatação dos concretos com adições minerais, em especial em faixas intermediárias a altas de relação a/ag.

Nas Figuras 5.8 e 5.9, estão apresentadas correlações entre o ganho de massa e a profundidade carbonatada nos dois grupos de concretos estudados.

Figura 5.8- Correlação entre ganho de massa e profundidade carbonatada dos concretos do grupo I.

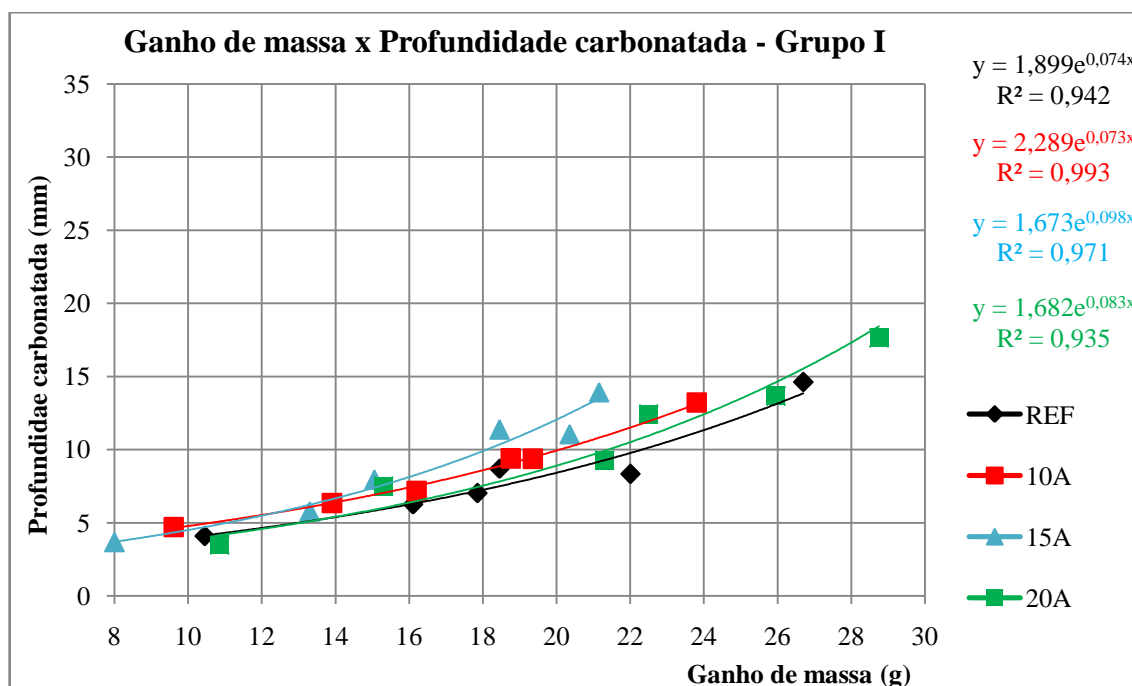
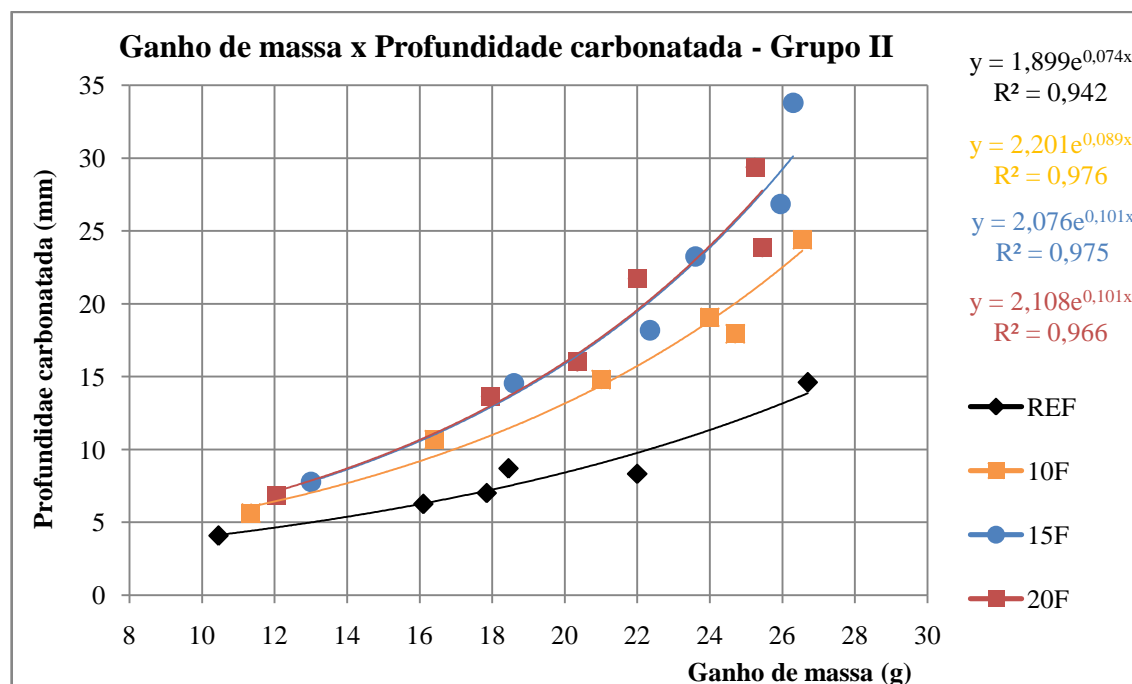


Figura 5.9- Correlação entre ganho de massa e profundidade carbonatada dos concretos do grupo II.



Observa-se, tanto na Figura 5.8(primeiro grupo)como na Figura 5.9(segundo grupo), que não existe uma relação direta ou linearentre as variáveis. Existe, sim, relação exponencial entre elas, com coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,94, o que denota uma excelente correlação entre a profundidade carbonatada e o ganho de massa. Esses resultados obtidos das correlações dão subsídios a que se possa indiretamente avaliar a

carbonatação de concretos por meio do monitoramento do ganho de massa, desde que a temperatura e, principalmente, a umidade relativa do ar (e também a umidade do concreto) sejam controladas e fixadas. No campo das pesquisas experimentais e dos estudos de laboratório, esse procedimento pode ser uma alternativa interessante, em termos metodológicos, a se agregar a outras técnicas de medida e análise da carbonatação.

5.2.2 Estimativa de vida útil de projeto

Neste item apresenta-se uma estimativa de vida útil de projeto das misturas estudadas, tomando como parâmetro a velocidade do processo de carbonatação, um dos importantes fatores que interferem na durabilidade dos concretos.

Para uma estimativa de vida útil mais realista, é preciso considerar o meio em que será inserida a construção, com todas as suas interferências, meio este que é de extrema importância para a durabilidade. A maioria das construções em concreto armado estrutural está concentrada nas regiões metropolitanas, onde o teor de CO₂ atmosférico gira em torno de 0,03% a 0,3% (NEVILLE, 1997). A norma NBR 6118 (ABNT, 2007) recomenda que as regiões sejam classificadas de acordo com classes de agressividade ambiental, conforme destaca a Tabela 5.6.

Tabela 5.6- Classes de agressividade ambiental (ABNT NBR 6118:2007).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ¹⁾²⁾	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ¹⁾²⁾	
IV	Muito forte	Industrial ¹⁾³⁾	Elevado
		Respingos de maré	

1) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

2) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes das estruturas protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

3) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústria de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Nesse contexto de atmosferas urbanas, pode-se dizer que uma parcela significativa das construções brasileiras está inserida na classe de agressividade II, e a norma recomenda, para essa classe, que os concretos tenham relações a/c máximas iguais a 0,60, classe estrutural mínima igual a 25 ($C \geq 25$) e cobrimento nominal mínimo de 25 mm (para o caso das lajes).

A norma NBR 15 575 (ABNT, 2013), que trata do desempenho das edificações, recomenda, para os sistemas estruturais de concreto armado, uma vida útil de projeto mínima de 50 anos.

Para a elaboração da Tabela 5.7, considerou-se a utilização do modelo de Tuutti (1982), baseado nas leis de Fick, que é um modelo reconhecidamente confiável para se descrever o avanço da frente de carbonatação no concreto. A partir, então, da equação de Tuutti (1982), considerando os valores dos coeficientes de carbonatação acelerada encontrados e a espessura de cobrimento mínima de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2007) para classe de agressividade II, estimou-se o tempo de vida útil das estruturas, de acordo com a Equação 5.1.

Salienta-se que a vida útil considerada neste exemplo diz respeito ao período de tempo até que se tenha a perda das condições essenciais para a durabilidade da estrutura de concreto; no caso, contempla o período desde a concepção inicial da estrutura até o momento que a frente de carbonatação atinge a profundidade da armadura, tornando iminente a sua despassivação. Este é um dos conceitos de “vida útil de projeto”, que difere da “vida útil de serviço”, quando já se constata evidências de danos e de deterioração estrutural.

$$e_c = k \sqrt{t} \rightarrow t = \left(\frac{e_c}{k}\right)^2 \quad (5.1)$$

Onde:

t = tempo efetivo de exposição para atingir a espessura de cobrimento.

e_c = espessura do cobrimento = profundidade carbonatada = 25 mm (NBR 6118);

k = coeficiente de carbonatação acelerada (mm/ $\sqrt{\text{semanas}}$).

Para a estimativa de vida útil em ambientes naturais, seria necessária uma correlação entre os coeficientes de carbonatação acelerada e natural. Castro *et al.* (2004), considerando os diversos modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação encontrados na bibliografia, sugere que as velocidades de carbonatação acelerada e natural

podem ser relacionadas por meio da raiz quadrada da razão entre as respectivas concentrações de CO₂, conforme exibido na Equação 5.2. Essa simplificação se torna possível devido ao fato de que os demais fatores (parâmetros) considerados nesses modelos são comuns aos processos de carbonatação acelerada e natural.

$$\frac{k_C}{k_N} = \sqrt{\frac{C}{N}} \quad (5.2)$$

Onde: k é a velocidade de carbonatação; C é a concentração de CO₂ utilizada no processo acelerado e N a concentração de CO₂ ambiente.

Tabela 5.7- Previsão de vida útil das estruturas para os concretos estudados.

Previsão de vida útil de projeto das estruturas para os concretos estudados						
Tipos de Concreto		Coeficientes de Carbonatação (mm/√semana)				
		*k = ambiente acelerado [CO ₂]= 6%	*k _n = ambientes naturais [CO ₂] e vida útil de projeto			
			Rural [CO ₂]=0,03%	Laboratório [CO ₂]=0,10%	Urbano [CO ₂]= 0,30%	Urbano ind. [CO ₂]=1,00%
R		3,10	0,22	0,40	0,69	1,27
	Vida útil (anos)	249	75	25	7	
GRUPO I	10A	3,12	0,22	0,40	0,70	1,27
		Vida útil (anos)	246	74	25	7
	15A	3,43	0,24	0,44	0,77	1,40
		Vida útil (anos)	204	61	20	6
	20A	4,14	0,29	0,53	0,93	1,69
		Vida útil (anos)	140	42	14	4
GRUPO II	10F	5,90	0,42	0,76	1,32	2,41
		Vida útil (anos)	69	21	7	2
	15F	7,99	0,56	1,03	1,79	3,26
		Vida útil (anos)	38	11	4	1
	20F	7,13	0,50	0,92	1,59	2,91
		Vida útil (anos)	47	14	5	1

*k = coeficiente de carbonatação acelerado, **k_n = coeficiente de carbonatação natural.

Obs.: as concentrações de CO₂ utilizadas foram baseadas em tabela proposta por Neville(1997).

Considerando as condições de exposição e clima característica da região de Goiânia, Ferreira (2013) comparou a carbonatação natural após 10 anos de exposição e a

carbonatação acelerada (concentração de CO₂ de 5,5%) de diversos concretos, com vários teores e tipos diferentes de adições minerais e encontrou uma correlação dada pela seguinte equação:

$$k = 7,3836 k_n \quad (5.2)$$

Onde:

k = coeficiente de carbonatação acelerada (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$).

k_n = coeficiente de carbonatação natural (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$).

Empregando-se, então, os dados acelerados do presente trabalho (em mm/ $\sqrt{\text{ano}}$) nessa equação, foram obtidos os coeficientes de carbonatação natural (em mm/ $\sqrt{\text{ano}}$) constantes na Tabela 5.8, assim como a vida útil de projeto estimada, em anos (tempo para a frente carbonatada atingir a prescrição nominal mínima de 25 mm para cobrimento de lajes). Percebe-se que os dados obtidos a partir da correlação de Ferreira (2013) são muito próximos dos da Tabela 5.7 referentes ao ambiente de laboratório. Esses dados são bastante convergentes e coerentes, haja vista que os protótipos do estudo de Ferreira (2013) se encontram armazenados em uma estação de envelhecimento protegida de intempéries na região metropolitana de Goiânia, assemelhando-se a um ambiente fechado de laboratório (um pouco mais agressivo, por possuir umidade relativa mais elevada do que em ambientes de laboratório).

Tabela 5.8- Coeficientes de carbonatação natural e vida útil de projeto estimada obtidas da correlação verificada por Ferreira (2013), a partir de dados de carbonatação acelerada deste trabalho.

Tipos de Concreto	Ambiente acelerado [CO ₂]= 6%		Ambiente natural (FERREIRA, 2013)	
	* k (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$)	k (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)	** k_n (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)	Vida útil de projeto (anos)
R	3,10	22,38	3,03	68
10A	3,12	22,53	3,05	67
15A	3,43	24,77	3,36	55
20A	4,14	29,90	4,05	38
10F	5,90	42,60	5,77	19
15F	7,99	57,70	7,82	10
20F	7,13	51,49	6,97	13

* k = coeficiente de carbonatação acelerado; ** k_n = coeficiente de carbonatação natural.

Obs.: para transformar o coeficiente de mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ para mm/ $\sqrt{\text{ano}}$, multiplicar por 7,221.

Como visto na Tabela 5.7, a vida útil das estruturas de concreto armado depende tanto da sua composição (tipo de materiais e proporcionamento) como do meio a que está inserido. Nenhum dos concretos estudados atenderia à norma de desempenho, por exemplo, se as estruturas fossem instaladas em ambientes com concentrações de CO₂ da ordem de 0,30% ou superior, porém para o ambiente rural praticamente todos os concretos, com exceção do 15F e 20F, atenderiam à referida norma. Portanto, a elaboração e apresentação dessa tabela não têm como pretensão produzir dados precisos de previsão de vida útil, mas, sim, mostrar que é preciso ter critérios na produção de concretos estruturais, levando em consideração a tecnologia da produção e a interação com o meio em que será inserido, com vistas à melhoria do seu desempenho com relação à durabilidade no que tange ao processo de carbonatação, que leva à deterioração das armaduras. Isto porque os resultados são muito díspares, podendo produzir durabilidade adequada, mas também podendo gerar resultados muito aquém daquilo que prevêm os códigos e normas.

5.3 ANÁLISE DA MINERALOGIA, MICROESTRUTURA E POROSIDADE DAS ARGAMASSAS DOS CONCRETOS

Neste item está apresentado e discutido o estudo da mineralogia, microestrutura e porosidade das argamassas dos concretos estudados. Para tanto, foram utilizadas a difratometria de raios X e a termogravimetria visando à identificação de compostos formados e consumidos após a cura e a carbonatação; a análise das micrografias, imagens feitas pelo microscópio eletrônico de varredura; e, por fim, a análise da porosidade obtida pela porosimetria por intrusão de mercúrio.

5.3.1 Resultados da difratometria de raios X

Os resultados da caracterização mineralógica estão apresentados de duas maneiras. Primeiro em forma de difratogramas, superpostos e em conjunto, dispostos por grupos de argamassa dos concretos estudados; depois em forma de tabela, Tabela 5.9, que traz um resumo de todos os compostos identificados nas argamassas não carbonatadas, após 125 dias de cura úmida, e carbonatadas do primeiro e segundo grupos. Nas Figuras 5.10 e 5.11 estão os difratogramas das argamassas não carbonatadas do primeiro e do segundo grupos, respectivamente, e nas Figuras 5.12 e 5.13 estão os difratogramas das argamassas carbonatadas do primeiro e segundo grupos, respectivamente.

Figura 5.10- Difratomogramas das amostras não carbonatadas do grupo I.

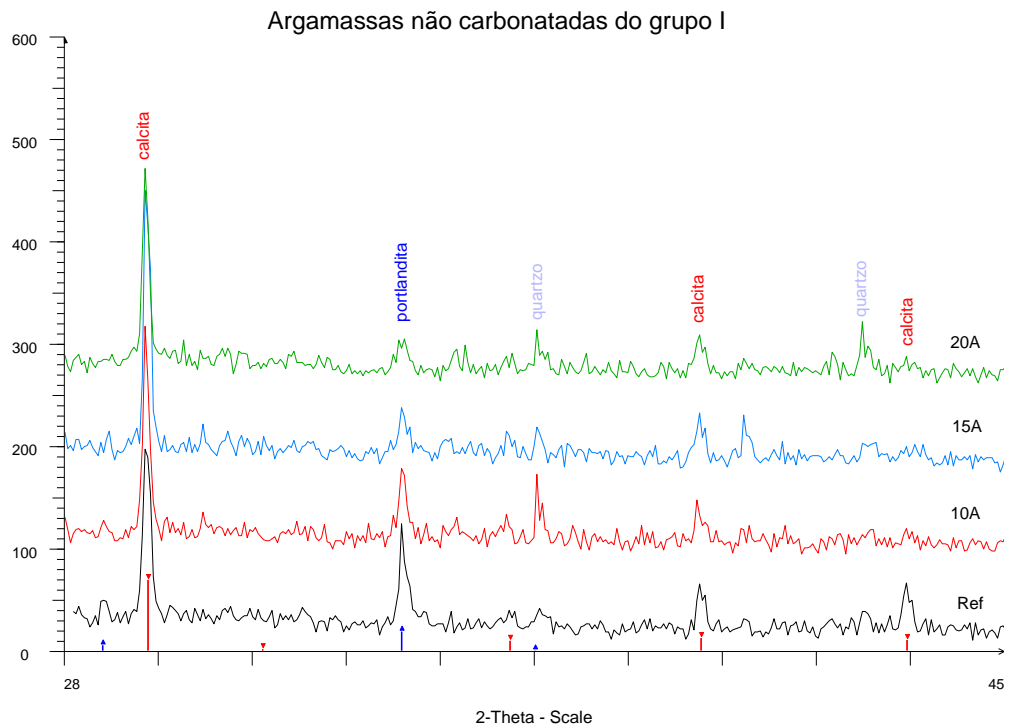


Figura 5.11- Difratomogramas das amostras não carbonatadas do grupo II.

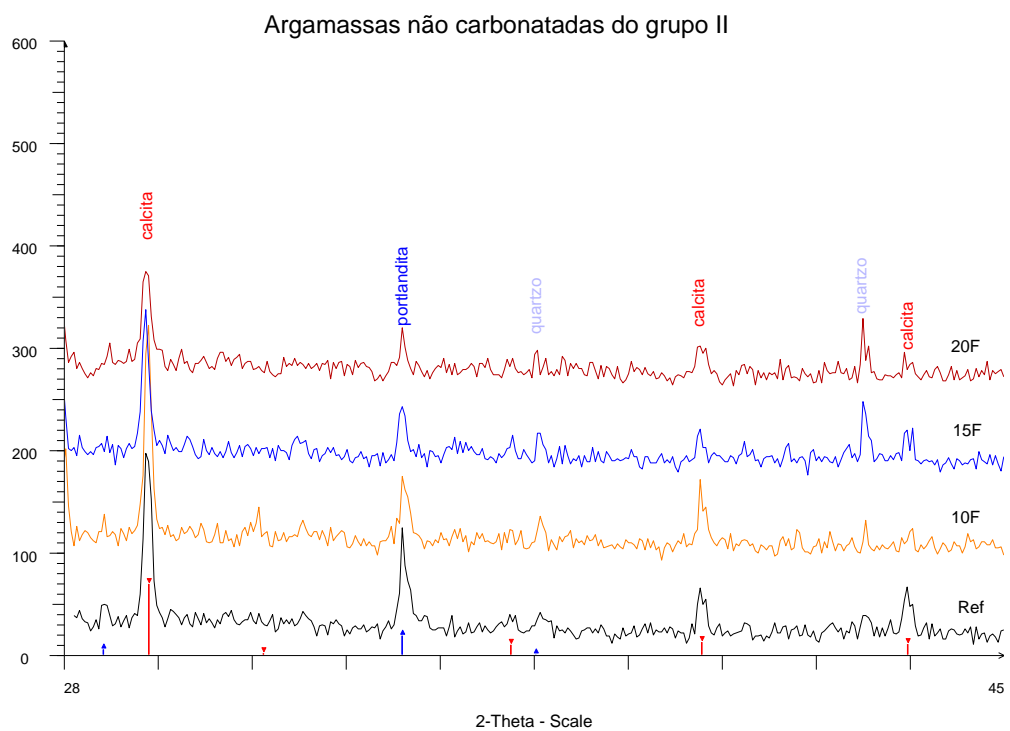


Figura 5.12- Difratomogramas das amostras carbonatadas do grupo I.

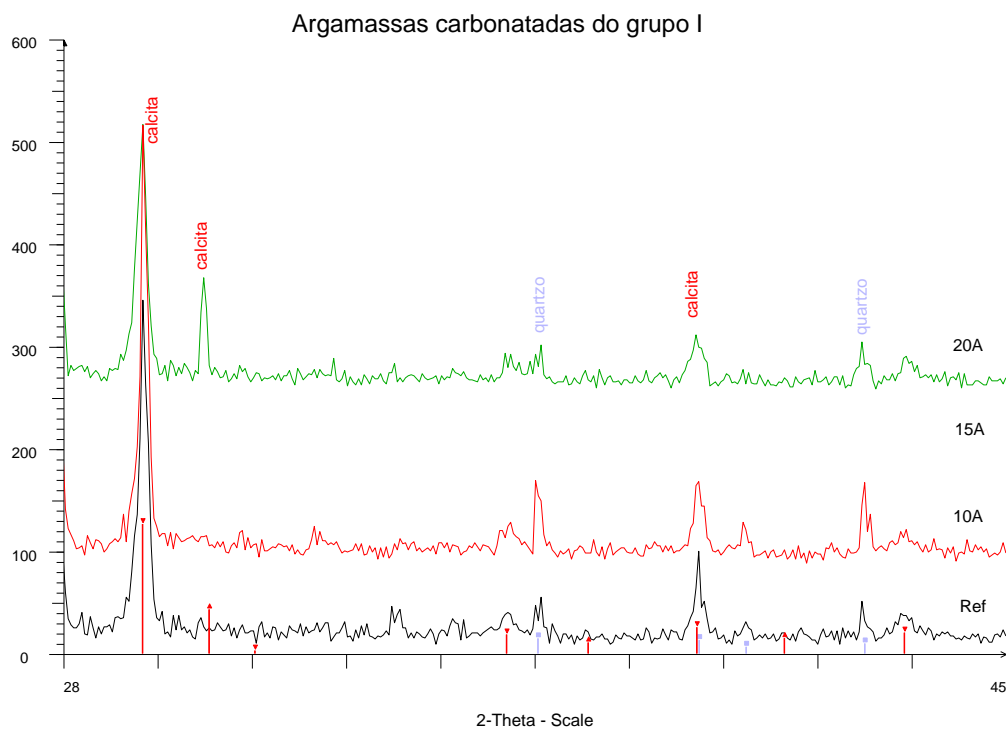
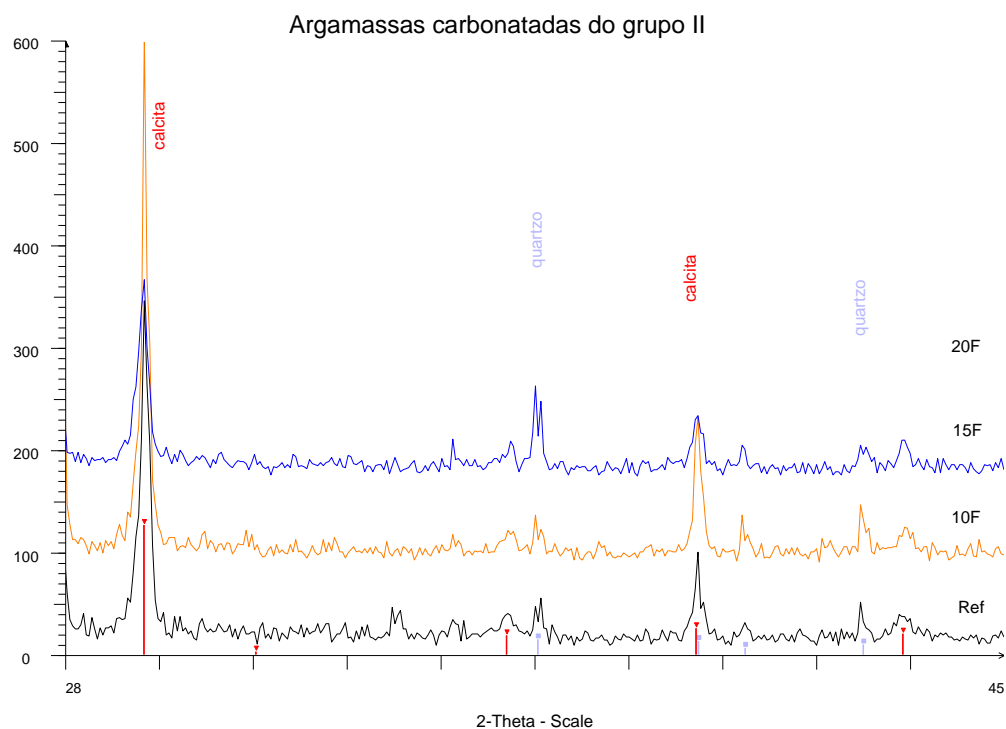


Figura 5.13- Difratomogramas das amostras carbonatadas do grupo II.



Os difratogramas individuais de cada uma das situações estão apresentados nas Figuras C.2 a C.15 do apêndice C.

Tabela 5.9- Resumo dos compostos identificados na análise mineralógica por DRX de todas as amostras.

Condição	Não carbonatadas							Carbonatadas						
	R	10A	15A	20A	10F	15F	20F	R	10A	15A	20A	10F	15F	20F
Quartzo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Feldspatos*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Biotita	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Montmorilonita	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X
Ca(OH) ₂ **	X	X	X	X	X	X	X	X						
Calcita	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Gesso	X	X	X	X	X	X	X							
Etringita	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
Silicato de Ca e Al. hidratado	X				X			X	X			X		
Anidrita			X			X	X						X	X
Silicato de Ca e Al.			X	X							X	X		

*Feldspatos: albita, microclínio e anortita; **Ca(OH)₂: portlandita.

Considerando que todas as amostras foram igualmente preparadas e submetidas à difratometria com os mesmos parâmetros, analisando as intensidades dos picos, é possível observar, por meio de comparação, nas Figuras 5.11 e 5.12, que há uma relação inversamente proporcional entre a quantidade de portlandita (Ca(OH)_2) e o teor de adição de metacaulim, ou seja, na medida em que se aumenta o teor de metacaulim das argamassas há uma redução na quantidade de portlandita (Ca(OH)_2) remanescente.

Ao se analisar as Figuras 5.13 e 5.14, nas argamassas com adição de metacaulim, observa-se a ausência de picos da portlandita, portanto, conclui-se que, durante o processo de carbonatação, a portlandita reagiu com o CO_2 e foi consumida originando outros compostos como a calcita (CaCO_3). Pode-se observar também, pela Tabela 5.9 e pelas Figuras 5.13 e 5.14, a presença da portlandita na argamassa de referência carbonatada, com picos de menor intensidade, o que leva a considerar que apesar da intensa exposição ao CO_2 , durante a carbonatação acelerada, a argamassa de referência teve a capacidade de manter traços desse mineral.

Em todas as amostras, carbonatadas ou não, identificou-se a presença da calcita. Os picos são mais intensos nas amostras carbonatadas, como era de se esperar, mas ocorrem também nas amostras não carbonatadas. Neste caso, a calcita presente decorre principalmente da presença de material carbonático (pó calcário, resíduo da britagem de rochas calcárias) como elemento de adição ao cimento, no caso o CP II F-32, e também dos agregados graúdos que são de origem litológica calcária.

5.3.2 Análise termogravimétrica

Os gráficos com os resultados do ensaio de termogravimetria do primeiro grupo estão apresentados nas Figuras 5.14 e 5.15, onde, na Figura 5.14, estão as amostras não carbonatadas, ao final de 125 dias de cura úmida submersa, e na Figura 5.15 estão as carbonatadas, após 12 semanas em regime de carbonatação acelerada em incubadora de CO_2 .

Figura 5.14- Análise termogravimétrica das amostras não carbonatadas do grupo I.

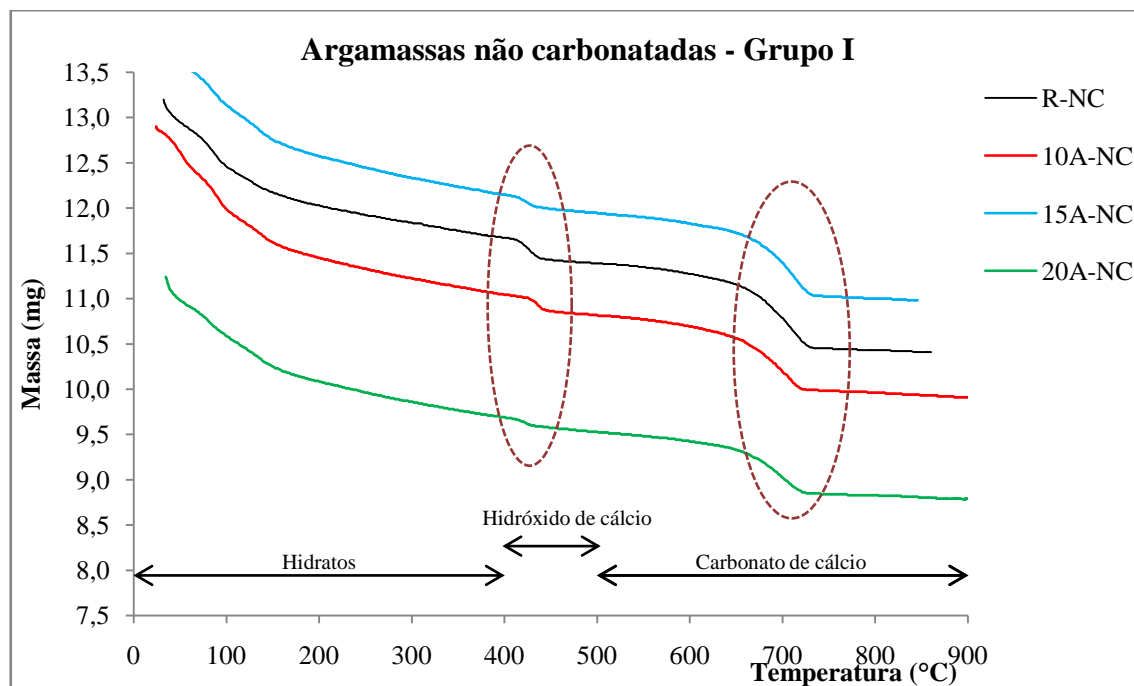
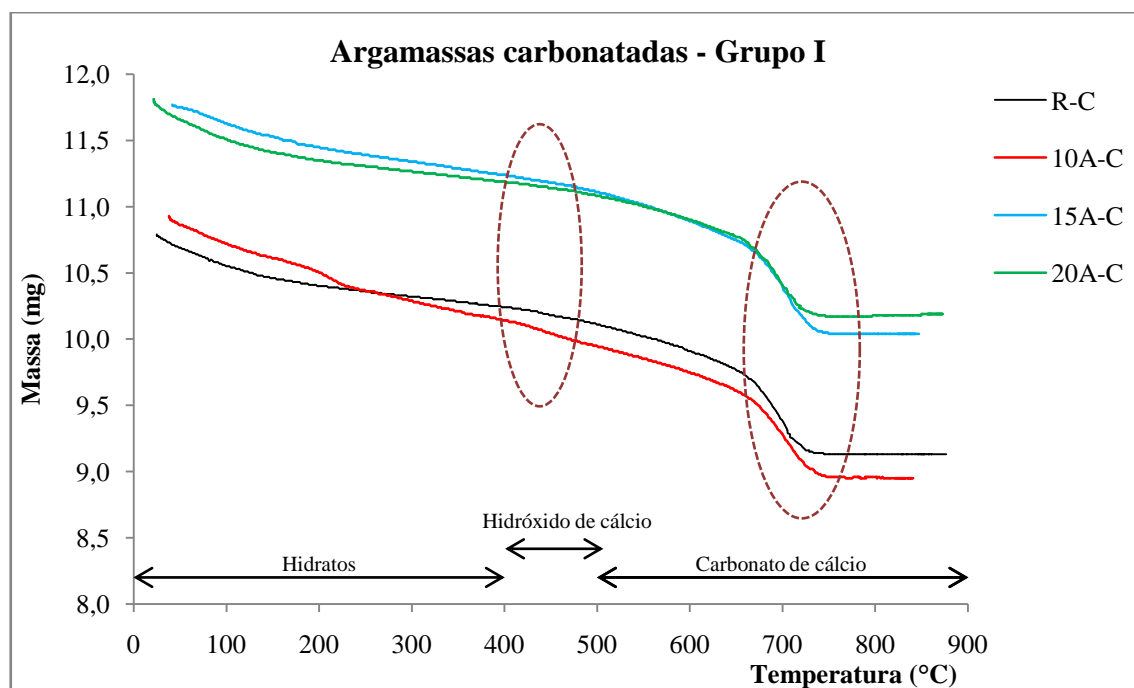


Figura 5.15- Análise termogravimétrica das amostras carbonatadas do grupo I.



Nas Figuras 5.16 e 5.17 estão apresentados os gráficos com os resultados do segundo grupo, onde, na Figura 5.16, estão as amostras não carbonatadas, ao final de 125 dias de cura úmida submersa, e na Figura 5.17 estão as carbonatadas, após 12 semanas de exposição em incubadora de CO_2 .

Figura 5.16- Análise termogravimétrica das amostras não carbonatadas do grupo II.

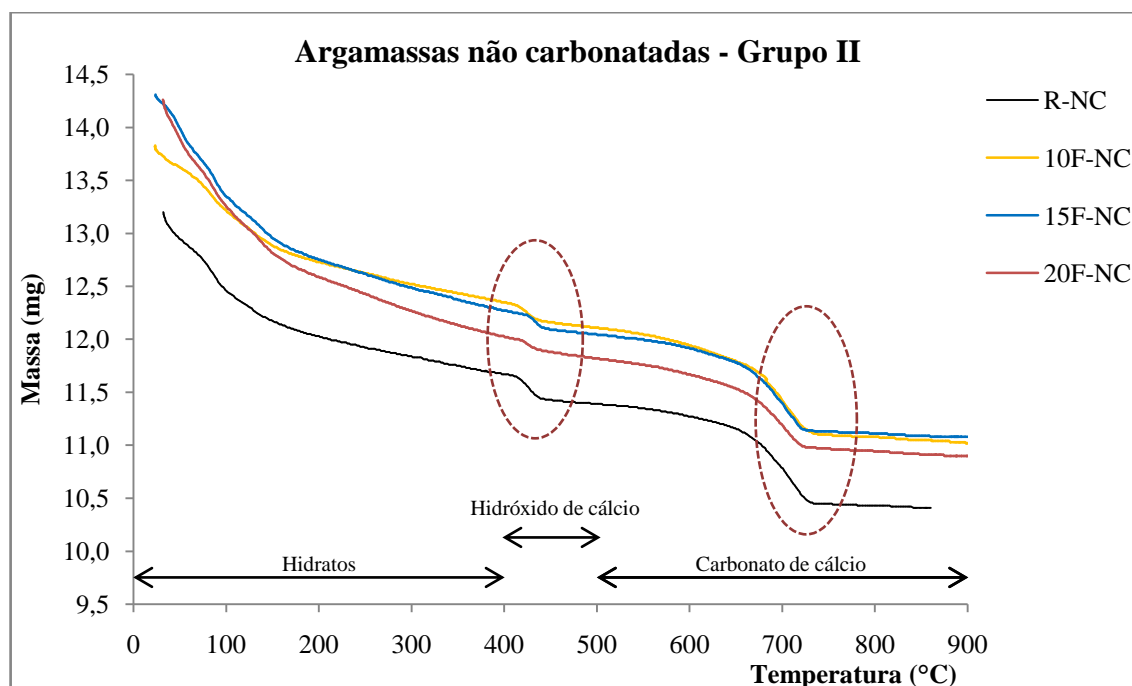
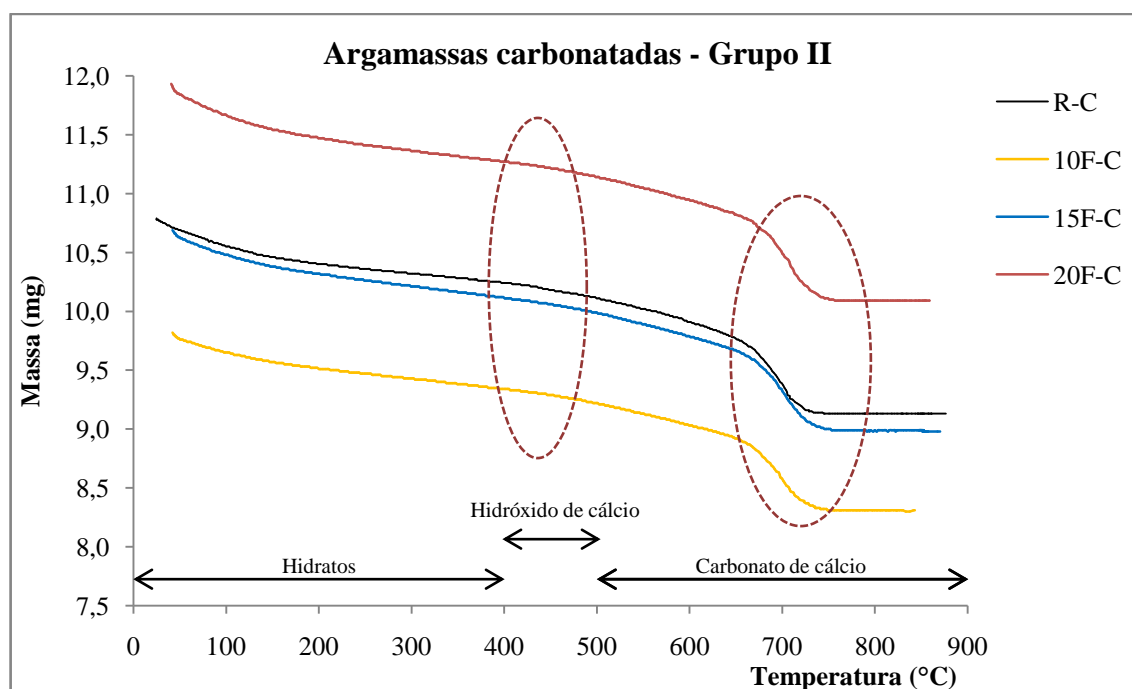


Figura 5.17- Análise termogravimétrica das amostras carbonatadas do grupo II.



Nas pastas de cimento, as perdas de massa são atribuídas à decomposição térmica dos hidratos (C-S-H, aluminatos e compostos de magnésio) em temperaturas que variam entre 130°C e 450°C, à desidratação do hidróxido de cálcio para variações entre 450°C a 605°C e à volatilização do anidrido carbônico do carbonato de cálcio que vai de 605°C a 1000°C (HOPPE FILHO, 2008). Segundo Cascudo e Carasek (2011), existem dificuldades técnicas

para distinção entre a calcita resultante da carbonatação dos hidratos do cimento e a do carbonato resultante dos agregados e do fíler calcário, porém, sabe-se que a calcita resultante da carbonatação dissocia-se antes do que a calcita combinada dos agregados devido à sua granulação mais fina. Assim, perdas de massa em temperaturas entre 530°C e 950°C podem ser atribuídas aos produtos carbonatados, enquanto que, entre 720°C e 980°C, podem ser provenientes dos agregados. Ainda, segundo Hoppe filho (2008), a calcita estável proveniente da carbonatação da portlandita dissocia-se entre, aproximadamente, 760°C e 950°C, enquanto as instáveis vaterita e aragonita, resultantes da carbonatação do C-S-H, são identificadas entre temperaturas aproximadas de 530°C a 760°C.

Analisando os gráficos das Figuras 5.14 e 5.16, referentes às argamassas não carbonatadas, constata-se a presença do hidróxido de cálcio por meio de picos de desidratação ou perda de massa na faixa de temperatura aproximada entre 400°C e 500°C. Também se observa uma tendência de declínio gradativo desses picos em relação ao teor de substituição, ou seja, há uma perda maior para a argamassa sem adição (R) e vai diminuindo gradativamente para as argamassas com 10%, 15% e 20% de substituição, respectivamente. Esse comportamento é devido, provavelmente, às reações pozolânicas entre o metacaulim e o hidróxido de cálcio.

Por outro lado, nas argamassas carbonatadas, Figuras 5.15 e 5.17, esse picos desaparecem ou são imperceptíveis, levando a considerar que todo o hidróxido de cálcio foi consumido, devido ao processo de carbonatação acelerada. Visualiza-se também, quando comparadas argamassas não carbonatadas e carbonatadas, um acréscimo nas intensidades dos picos do carbonato de cálcio, na faixa de temperatura entre 600°C e 800°C, o que demonstra um maior consumo desse composto nas argamassas carbonatadas, como era de se esperar, também devido ao processo de carbonatação acelerada.

5.3.3 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Todos os concretos foram submetidos ao ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio após 125 dias de cura úmida submersa (antes da carbonatação) e depois de 12 semanas de carbonatação acelerada, sendo analisadas somente a região carbonatada desses concretos.

Os resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio estão apresentados de duas maneiras: na forma de porosidade total, ou seja, volume total de mercúrio intrudido, onde nas ordenadas estão o volume acumulado de mercúrio; e na forma de distribuição dos tamanhos dos poros, onde nas ordenadas estão a distribuição do volume de intrusão; ambas em função dos diâmetros dos poros, que são apresentados nas abscissas, em μm . Os dados do ensaio das argamassas não carbonatadas estão apresentados nos gráficos das Figuras 5.18 e 5.19.

No gráfico da Figura 5.18, em relação à argamassa do concreto de referência, observa-se que: as argamassas de concretos 10A e 15A têm menor porosidade total; as 10F e 15F apresentam porosidades totais quase idênticas e bem próximas; a 20A e principalmente a 20F apresentam porosidades totais bem superiores à referência.

No gráfico da Figura 5.19, nota-se que as argamassas dos concretos 20F, 20A e 15A apresentam grande parte de seus poros com diâmetros na faixa de 30 μm a 300 μm , sendo que há disparidades maiores e graduais para as argamassas 20F e 20A, respectivamente.

É necessário, no entanto, fazer uma ressalva em relação à faixa de diâmetro de poros dessa análise, já que, Diamond^{5.2} (2000 *apud* KULAKOWSKI, 2002) aconselha descartar esta técnica como um método de medida de distribuição de tamanho de poros, podendo ser usada, entretanto, para comparação entre amostras, tomando os dados de diâmetro crítico de poros e de volume de poros passíveis de serem intrudidos por mercúrio, pois as curvas de distribuição de tamanho de poros sistematicamente deslocam os tamanhos de poros, fixando tamanhos inferiores aos detectados por outras técnicas.

^{5.2}DIAMOND, S. Effects of two danish flyashes on alkali contents of pore solutions of cement-flyash pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 11, n. 3, p. 383-394, 2000.

Figura 5.18- Porosimetria por intrusão de mercúrio das amostras não carbonatadas (volume acumulado).

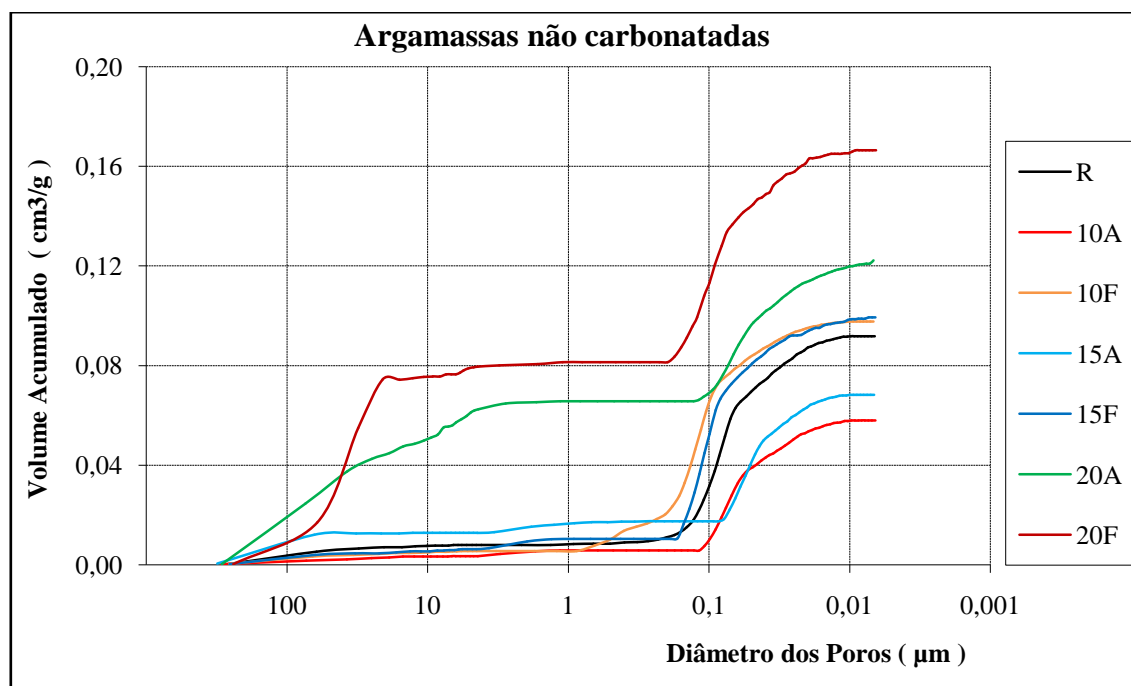
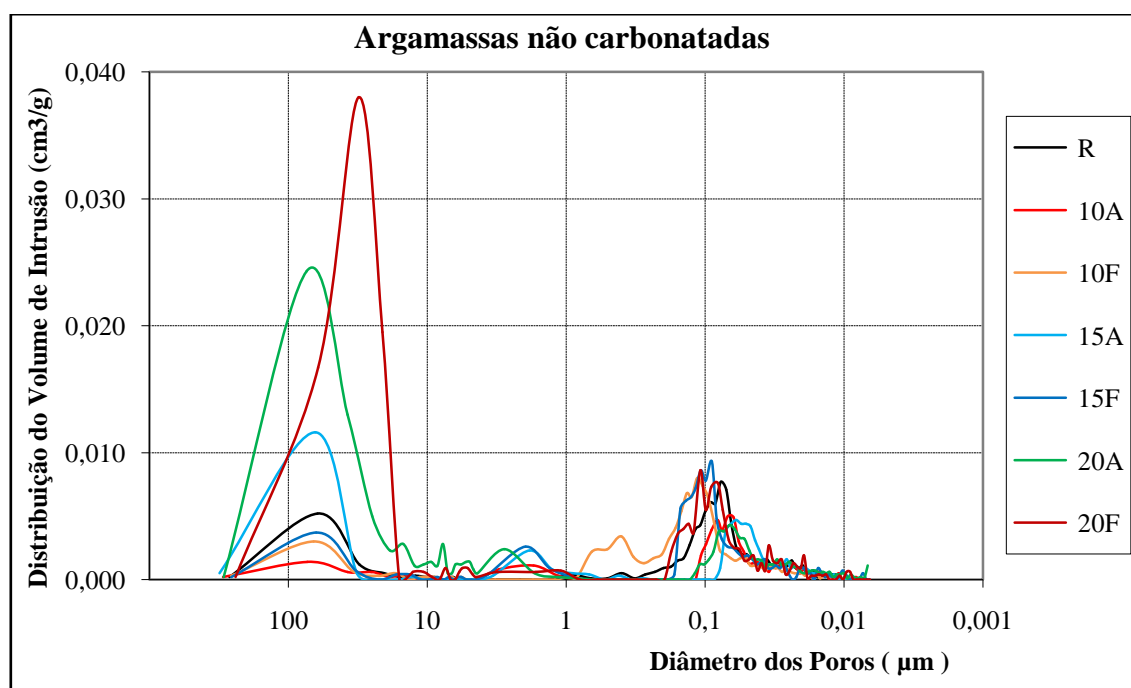


Figura 5.19- Porosimetria por intrusão de mercúrio das amostras não carbonatadas (distribuição do volume).



De maneira geral, nos concretos não carbonatados, nota-se que há um refinamento de poros nas argamassas de concretos 10A, 10F e 15F, de forma gradual e sucessiva em relação à referência. Na amostra 15A, apesar do decréscimo da porosidade total, houve acréscimo na faixa de poros maiores entre 30 µm a 300 µm (fato ocorrido também para a amostra 20A), comportamento não esperado, pois, para concretos com mesma relação a/ag

e com com adições minerais reativas, espera-se uma densificação da pasta e da zona de transição com o refinamento dos poros pela ocorrência de reações pozolânicas.

A seguir estão apresentados os dados das argamassas carbonatadas nos gráficos das Figuras 5.20 e 5.21.

Figura 5.20- Porosimetria por intrusão de mercúrio das amostras carbonatadas (volume acumulado).

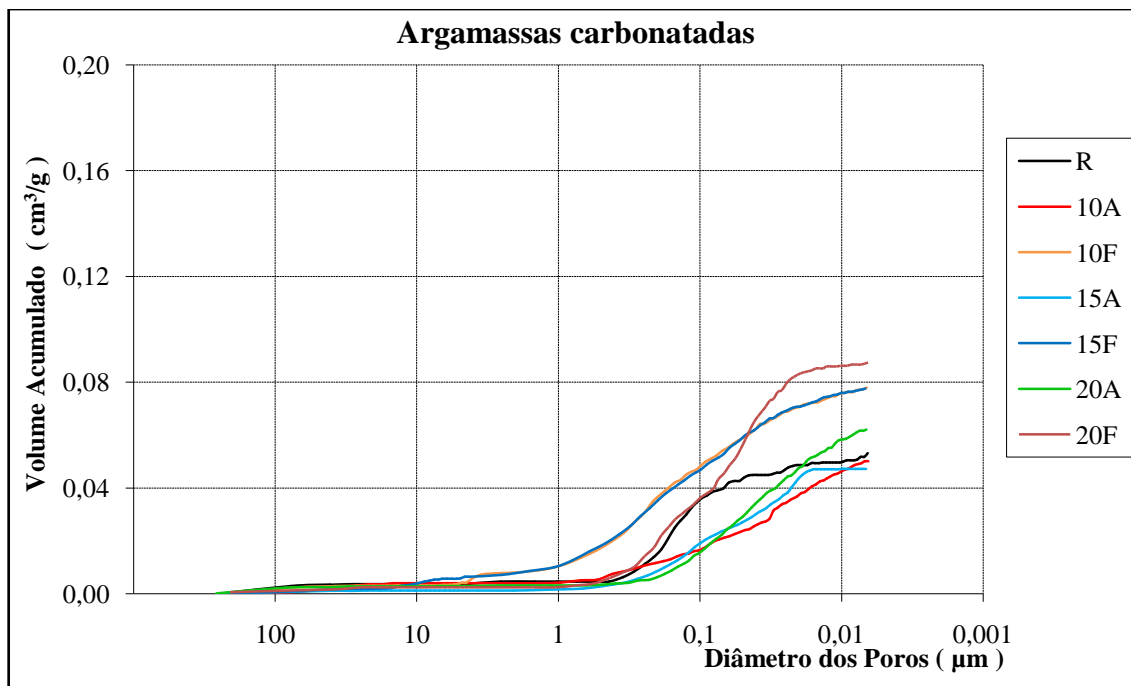
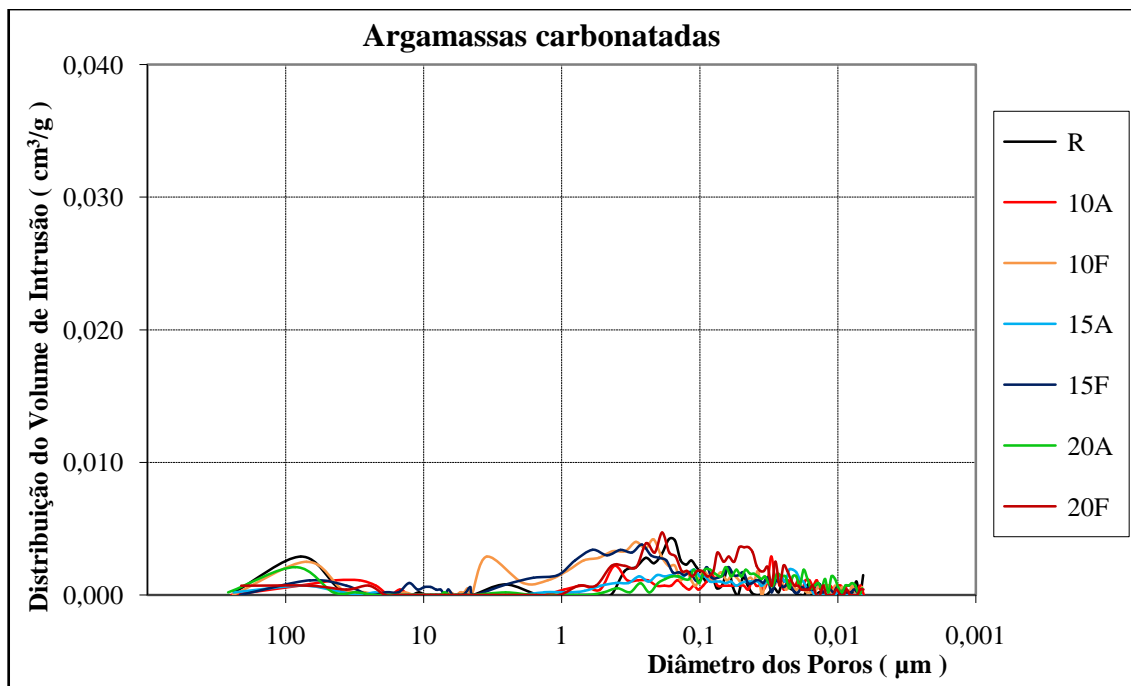


Figura 5.21- Porosimetria por intrusão de mercúrio das amostras carbonatadas (distribuição do volume).



Comparando os gráficos das Figuras 5.19 e 5.21, que mostra a distribuição do volume de poros pela intrusão de mercúrio dos concretos carbonatados, nota-se uma sensível redução do volume de poros entre 30 μm e 300 μm , principalmente nos concretos 20F, 20A e 15A respectivamente, e também uma pequena redução no volume de poros próximos a 0,1 μm . Percebe-se ainda uma redistribuição dos poros maiores para uma faixa entre 0,01 μm e 5 μm , ou seja, houve um refinamento com a colmatação dos poros maiores devido as reações de carbonatação.

Olhando para os gráficos das Figuras 5.18 e 5.20, que mostra o volume acumulado de poros pela intrusão de mercúrio, percebe-se uma redução do volume total de poros em todos os concretos, num percentual aproximado de 50%, com exceção dos concretos 10A e 15A que obtiveram menores reduções percentuais. Nota-se ainda uma clara divisão em dois grupos distintos, onde os concretos do primeiro grupo ficaram com volume totais menores e próximos uns dos outros, o mesmo ocorrendo com os concretos do segundo grupo que ficaram com volumes totais maiores. Percebe-se, também, que houve uma redução mais acentuada de poros nos concretos que apresentaram uma maior volume de poros maiores, o que nos leva a concluir que as reações de carbonatação acontecem com mais intensidade nos poros maiores, o que pode levar a uma melhoria no sistema de poros de concretos com maior porosidade total.

É possível concluir, olhando somente para os resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio, que as reações de carbonatação são mais pronunciadas do que as reações pozolânicas, levando a um maior refinamento pela colmatação dos poros.

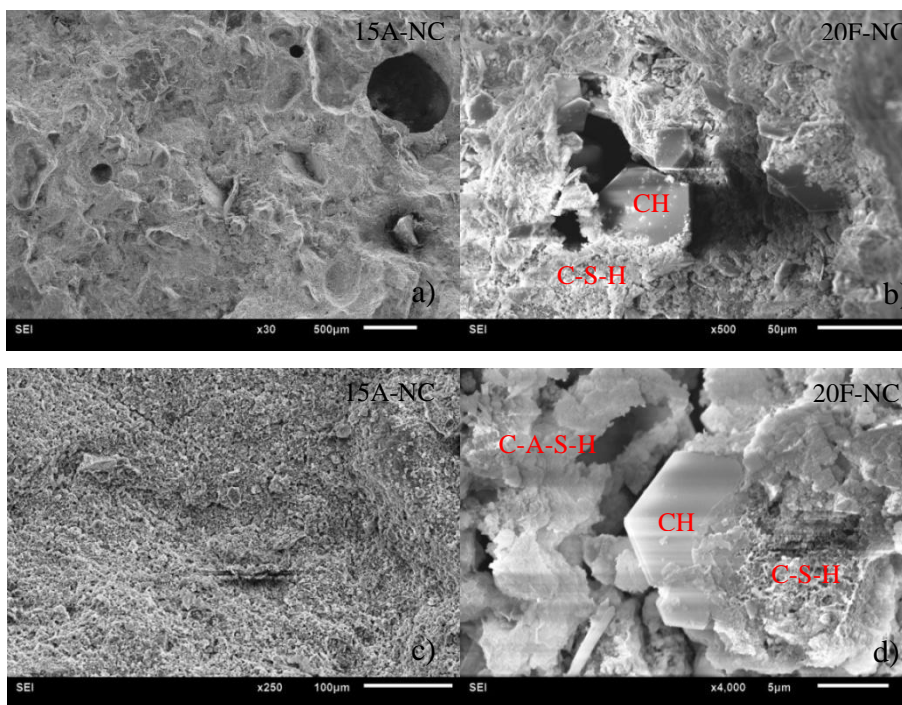
5.3.4 Microscopia eletrônica de varredura

Foram analisadas amostras das argamassas dos concretos após 125 dias de cura úmida submersa e antes da carbonatação, extraídas das regiões das faces laterais e partes internas centrais; e também amostras extraídas após 12 semanas de carbonatação acelerada, extraídas somente de regiões totalmente carbonatadas.

A superfície de cada amostra fraturada foi percorrida em toda a sua extensão, buscando identificar as características relacionadas à topografia e à morfologia dos compostos provenientes da hidratação do cimento, das reações pozolânicas e de carbonatação.

Na Figura 5.22 estão as micrografias das amostras não carbonatadas, aos 125 dias, final do processo de cura úmida submersa, onde podem ser observadas as presenças de C-S-H, CH, C-A-S-H e C-A-H.

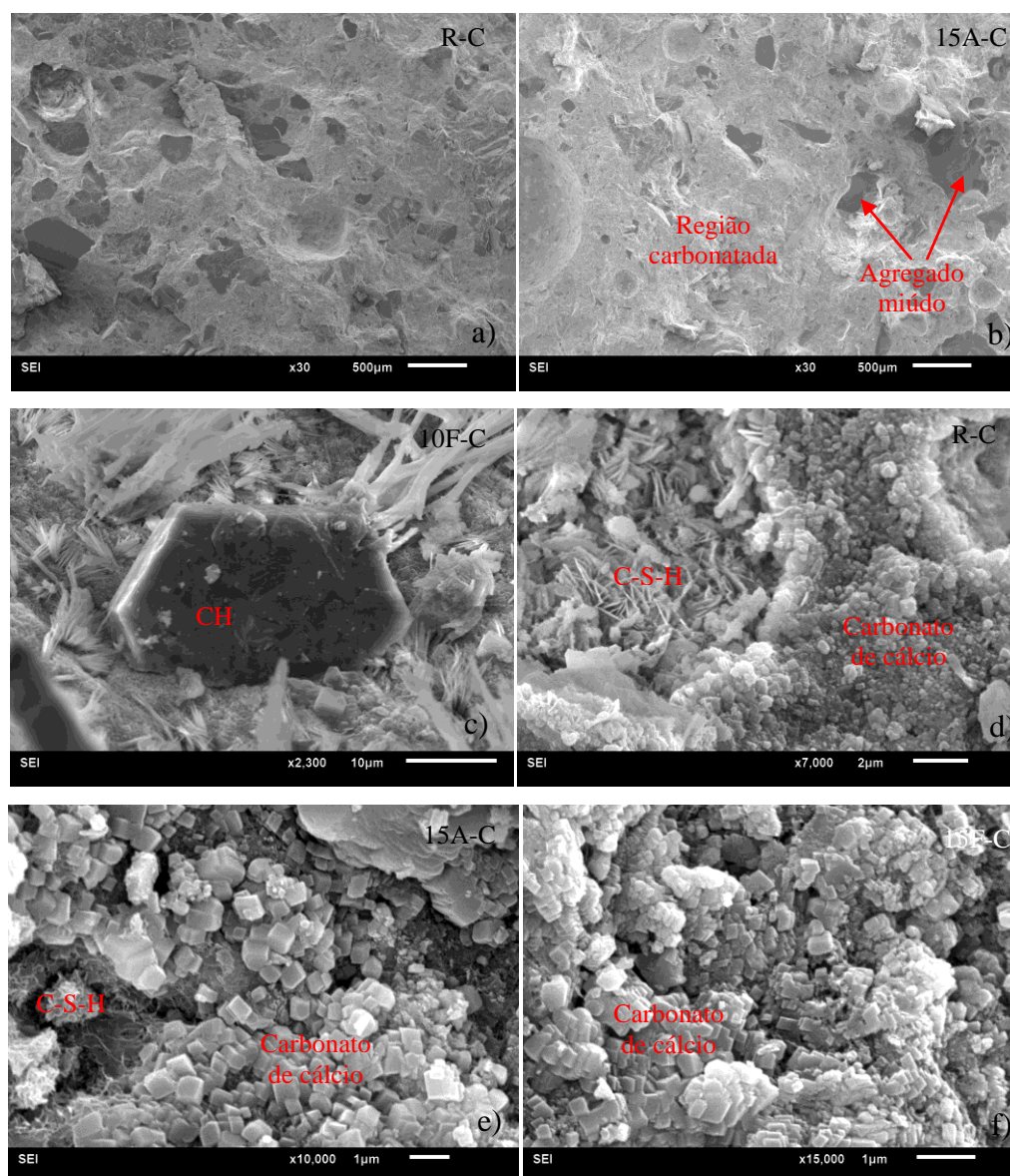
Figura 5.22- Micrografias de argamassas de concretos não carbonatadas, onde se tem em a) concreto 15A com ampliação de 30 vezes, em b) concreto 20F com ampliação de 500 vezes, em c) concreto 15A com ampliação de 250 vezes e em d) concreto 20F com ampliação de 4000 vezes.



Observa-se na Figura 5.22, nas micrografias a) e c), argamassas de concreto com estrutura densificadas, e a presença do hidróxido de cálcio (CH) e do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) nas micrografias b) e d).

Na Figura 5.23, estão as micrografias das amostras carbonatadas, após 12 semanas de carbonatação acelerada, que foram retiradas somente da região carbonatada das argamassas dos concretos estudados, onde observa-se abundante presença de carbonato de cálcio.

Figura 5.23- Micrografias de argamassas de concretos carbonatadas onde se tem: a) e b) amostras dos concretos R e 15A com ampliação de 30 vezes; c) amostra do concreto 10F com ampliação de 2300 vezes; d) amostra do concreto R com ampliação de 7000 vezes; e) amostra do concreto 15A com ampliação de 10 000 vezes; e f) amostra do concreto 15F com ampliação de 15 000 vezes.



Observa-se na Figura 5.23, nas micrografias a) e b), argamassas de concreto totalmente carbonatadas (regiões mais claras) e os agregados que não se carbonatam; na micrografia c), a presença do hidróxido de cálcio (CH); na d), regiões com presença de carbonato de cálcio provenientes da carbonatação acelerada e regiões com predominância do C-S-H; e nas micrografias e) e f), carbonatos de cálcio na forma cristalina romboédrica, típicas da calcita.

De maneira geral, observou-se nas micrografias, antes da carbonatação acelerada, uma estrutura mais densa nas argamassas de concretos do primeiro grupo. Essa densificação também se mostrou em todos os concretos pós carbonatados. Verificou-se somente a presença da calcita (forma cristalina romboédrica do carbonato de cálcio) para todas as argamassas carbonatadas.

5.4 ANÁLISE E DISCUSSÃO GLOBAL DOS RESULTADOS

De maneira geral, houve uma tendência de piora do desempenho global no tocante à carbonatação, com a incorporação de metacaulim, nessa faixa de resistência considerada ($f_{ck}=30$ MPa e relação a/ag da ordem de 0,60). Porém quando se agrega teores de 10% até 15%, mantendo-se fixa a relação a/ag, as diferenças de comportamento são muito pequenas, pouco significativas (na última idade as profundidades carbonatadas desses concretos foram menores do que o de referência). Esses resultados destacam claramente haver uma faixa ótima de teores incorporados, pois com 20%, mesmo mantendo-se a relação a/ag, o desempenho caiu.

Ao se incorporarem essas adições na mesma faixa de resistência ou, em outras palavras, permitindo-se o aumento da relação a/ag, tem-se claramente uma perda no desempenho da carbonatação. Embora no presente trabalho não se tenha podido trabalhar rigorosamente na mesma faixa de resistência do concreto de referência, vislumbra-se essa tendência de pior comportamento, já que os concretos com metacaulim do segundo grupo foram destacadamente menos resistentes à carbonatação.

O trabalho em geral, considerando resistências e relação a/ag de concretos usuais do mercado local, ressalta a relevância do controle da relação a/ag condicionada à incorporação do metacaulim. Isto significa que os benefícios trazidos pelo metacaulim não prescindem de uma limitação da relação a/ag, que continua sendo o principal parâmetro definidor da qualidade e durabilidade nessa faixa de resistência do concreto.

Os concretos com adição de metacaulim nos teores de 10% e 15%, na mesma relação a/ag mostraram bons resultados porque, a despeito de uma menor quantidade residual de Ca(OH)_2 na pasta de cimento (menor reserva alcalina), ele de fato introduz alterações positivas na matriz cimentícia em termos de redução da porosidade global e refinamento de poros, e de aumento da compacidade e resistência mecânica, como visto nos resultados apresentados no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir são apresentadas as conclusões em relação ao trabalho desenvolvido, as considerações sobre a metodologia empregada, e as sugestões para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES DA PESQUISA

Baseando-se nos resultados encontrados nos ensaios, para os materiais e condições utilizadas neste estudo, chegou-se às seguintes conclusões:

- a) Houve acréscimo gradual na resistência à compressão dos concretos com incorporação por substituição de metacaulim em relação ao concreto de referência, sendo obtidos ganhos percentuais entre 8% e 16% ao final do processo de cura, desde que mantida fixa a relação água/aglomerante.
- b) O coeficiente de carbonatação acelerada tende a aumentar com o acréscimo no teor de metacaulim utilizado no concreto em substituição ao cimento, ou seja, a velocidade da frente de carbonatação aumenta com o aumento do teor de metacaulim. Porém, para os concretos do primeiro grupo, em que se manteve a relação a/ag fixa e igual a 0,6, esses coeficientes ficaram bem próximos ao concreto sem adição, não denotando perda sensível de desempenho.
- c) A relação a/ag exerce grande influência no processo de carbonatação, sendo observados aumentos de aproximadamente 2,5 vezes no coeficiente de carbonatação nas maiores relações a/ag em relação ao concreto de referência. Com isso, pode-se afirmar que nessa faixa de relação a/ag dos concretos correntes de mercado (da ordem de 0,6), não é adequada a incorporação de metacaulim fixando-se a resistência, pois há o risco de acréscimos importantes na relação a/ag. No presente trabalho, apesar dos concretos do Grupo II não terem permanecido rigorosamente na mesma faixa de resistência dos concretos do Grupo I e do concreto de referência, percebeu-se neles uma queda considerável no desempenho quanto à carbonatação, o que decorre do aumento da porosidade e da conexão dos poros em virtude do aumento da relação a/ag

para valores de até 0,74 (além da diminuição do CH remanescente na pasta, o que reduz a reserva alcalina dos concretos com metacaulim).

- d) Houve um consumo considerável do hidróxido de cálcio devido às reações pozolânicas, mas não suficiente para consumi-lo totalmente. Após o processo de carbonatação, ainda foram encontrados e observados traços do hidróxido de cálcio no concreto de referência (R), detectado pelo ensaio de difração de raios X e também no concreto 10F por micrografia obtida pelo MEV.
- e) Constatou-se uma redução na porosidade total somente nos concretos com 10% e 15% de adição de metacaulim do primeiro grupo (mantida fixa a relação a/ag), detectados no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio. Também se percebeu uma redução de poros maiores para esses concretos, caracterizando assim um refinamento de poros. Este aspecto, que envolve uma alteração da estrutura física da pasta de cimento, com menor interconexão de poros e redução das taxas de transporte de agentes agressivos na estrutura porosa do material, provavelmente explica os resultados de carbonatação desses concretos muito próximos aos do concreto de referência, a despeito da menor quantidade de CH remanescente (reserva alcalina) neles.
- f) Os melhores desempenhos alcançados em relação ao processo de carbonatação foram os concretos do Grupo I (mesma relação a/ag) com 10% e 15% de metacaulim, os quais, apesar de terem coeficientes de carbonatação levemente superiores ao concreto de referência, atingiram, por sua vez, profundidades carbonatadas menores do que as do concreto de referência ao final das 16 semanas de carbonatação acelerada.
- g) Considerando todas as características e propriedades avaliadas nesta pesquisa, além da questão específica da carbonatação, o concreto do primeiro grupo com 10% de metacaulim foi o que apresentou os melhores resultados globais.
- h) Houve uma redução discreta na absorção de água por imersão e no índice de vazios com o acréscimo de metacaulim até a proporção de 15%, para os concretos do primeiro grupo com a mesma relação a/ag. Houve, também, uma tendência de aumento nessas propriedades com o aumento da relação a/ag (concretos do segundo grupo). Conclui-se, portanto, para essa faixa de resistência típica dos concretos usuais de mercado, que a interferência do metacaulim nessas propriedades não é significativa.

- i) Com os resultados obtidos nas correlações entre profundidade carbonatada e ganhos de massa, conclui-se que é possível avaliar indiretamente a carbonatação por meio do monitoramento do ganho de massa, no campo das pesquisas experimentais, desde que se controlem adequadamente a temperatura e a umidade nos ambientes de análise.

6.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA EMPREGADA

Na adoção de corpos de prova prismáticos de concreto com dimensões de 10 cm x 10 cm x 5 cm para os ensaios de profundidade carbonatada e ganhos de massa, passando pelo condicionamento, as dificuldades encontradas foram na confecção das fôrmas, no adensamento com vibrador agulha, na desmoldagem e também na reutilização dessas fôrmas de madeira. Contudo, essas dimensões se mostraram bastante satisfatórias, pois, devido ao baixo peso e volume dos corpos de prova, todo o trabalho posterior à moldagem ficou mais simples e prático, como o transporte e manuseio dos corpos de prova, a facilidade de colocação e distribuição dessas amostras nas estufas, na câmara climática e na incubadora de CO₂. A facilidade também se mostrou no monitoramento das massas durante o processo de condicionamento e de ganhos de massa após carbonatados, no processo de fratura e de medida de profundidade carbonatada.

As amostras de argamassa com dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm, que foram concebidas para os ensaios microestruturais e de caracterização mineralógica, apesar da facilidade de confecção e manuseio, apresentaram limitações durante as análises em geral, devido principalmente à presença dos agregados miúdos e da fração mais fina dos agregados graúdos, e também, em determinadas análises, do tipo de cimento empregado. Provavelmente, seriam obtidos melhores resultados se fossem utilizadas pastas dos aglomerantes (cimento + metacaulim) para as análises dos produtos formados antes e após a carbonatação, como o hidróxido de cálcio e o carbonato de cálcio. Por outro lado, tais amostras se afastariam bastante do material final que é o concreto.

Em relação ao condicionamento, adotou-se a recomendação da RILEM TC 116-PCD (1999), por ser um procedimento que permite conhecer as condições iniciais de umidade interna dos corpos de prova em equilíbrio com as condições do ambiente (dados que são importantes para serem utilizados em modelos de predição) e por ter grande influência nos resultados de profundidade carbonatada; portanto, trata-se de uma etapa importante e que deve ser considerada nos estudos de carbonatação. Porém, esse procedimento se mostrou

bastante trabalhoso e necessita ainda de ajustes com regras mais claras e de fácil execução, para que se possa obter uma padronização necessária e assim atingir resultados que venham a ser comparados entre as várias pesquisas. Entre as regras ou ações que ainda não estão bem definidas estão: a necessidade ou não de moldagem prévia para estabelecimento dos parâmetros do condicionamento, a idade para o início e o tempo requerido em cada etapa, os materiais e equipamentos adequados que devem ser utilizados (embalagens, tipo de impermeabilizante, estufas, câmaras etc.) e os cuidados a serem tomados durante todo o processo (carbonatação precoce, perda de massa por queda ou batidas etc.).

Para as medidas de profundidade carbonatada, na obtenção dos dados desta pesquisa, optou-se por utilizar a técnica de corte das amostras com disco diamantado refrigerado com água, ao invés da fratura do concreto com a quebra manual ou ruptura diametral, como recomenda o procedimento CPC-18 (RILEM, 1988). Esse procedimento mostrou-se mais vantajoso por apresentar maior praticidade na execução e proporcionar uma superfície regular e plana, favorecendo a execução das medidas por meio do paquímetro digital e a utilização de programa computacional por meio de fotografias digitais. Para o procedimento de leitura das profundidades carbonatadas, adotou-se o tempo de aproximadamente 30 minutos após aspersão da fenolftaleína, que se mostrou bastante satisfatório, apresentando maior praticidade e funcionabilidade na condução da pesquisa. Tanto o corte das amostras com disco, quanto a mensuração em 30 minutos após a aspersão do indicador, foram medidas respaldadas no trabalho de Ferreira (2013), que concluiu não haver diferenças significativas em relação aos procedimentos tradicionais, tendo como base um volume muito elevado de amostras e medidas.

6.3 CONSIDERAÇÃO FINAL

Apesar de não ter sido encontrado nesses concretos (que representam concretos de uso corrente no mercado) um teor de metacaulim que efetivamente diminua o avanço da frente de carbonatação, implicando assim em aumento da durabilidade em relação à carbonatação, os concretos com 10% e 15% de substituição do primeiro grupo obtiveram comportamentos bem próximos ao concreto de referência, o que torna a adição do metacaulim altamente recomendável para os teores citados, devido ao ganho proporcionado por essa adição em relação aos demais processos de deterioração que levam os concretos a uma menor durabilidade e vida útil (corrosão de armaduras iniciada por

cloretos, ataque por sulfatos, reação álcali-agregado, susceptibilidade à lixiviação pela ação de águas, etc.).

6.4 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A partir do desenvolvimento do presente trabalho, ficaram evidenciadas algumas dificuldades e alguns aspectos que merecem estudos mais aprofundados. Surgiram, então, ideias e questionamentos, que podem fluir para a estruturação de trabalhos futuros, como segue:

- a) Estudar um condicionamento mais simples e prático, utilizando câmara climática ou câmara úmida, permitindo controlar os parâmetros de umidade relativa e temperatura que serão utilizados no processo de carbonatação acelerada. Evidentemente que um procedimento como este deve ser validado comparando-se aos resultados obtidos pelo método da RILEM.
- b) Estudar concretos com teores de 10%, 15% e 20% de metacaulim em substituição ao cimento, porém variando as relações a/ag (acima de 0,50) para se atingir outros níveis de porosidade, verificando o comportamento desses concretos em relação à profundidade carbonatada e sua correlação com o ganho de massa.
- c) Realizar estudo paralelo entre carbonatação acelerada e carbonatação natural, utilizando os mesmos teores de metacaulim, padronizando os procedimentos de cura, condicionamento e medidas de frente de carbonatação. Ao final, verificar a correlação existente entre os dois processos de carbonatação, para os fins de estimativa de vida útil das estruturas de concreto.
- d) Desenvolver estudo, utilizando os mesmos teores de metacaulim, com monitoramento do concreto para várias idades, correlacionando a carbonatação com outros parâmetros de durabilidade (resistência à compressão, absorção de água, resistividade elétrica do concreto, permeabilidade ao ar e à água, difusão de cloretos, etc.), contemplando as mudanças microestruturais, químicas e mineralógicas da pasta durante o monitoramento.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003, 6 p.

ABNT_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007, 9 p.

ABNT_____. **NBR 5751**:Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica — Índice de atividade pozolânica com cal Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012, 4 p.

ABNT_____. **NBR 5752**:Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012, 4 p.

ABNT_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2007, 221 p.

ABNT_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009, 9 p.

ABNT_____. **NBR 8953**:Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2011, 4 p.

ABNT_____. **NBR 9778**:Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009, 4 p.

ABNT_____. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica,do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008, 7 p.

ABNT_____. **NBR 11 578**: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1997, 5 p.

ABNT_____. **NBR 12 653**: Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012, 5 p.

ABNT_____. **NBR 12 655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2006, 18 p.

ABNT_____. **NBR 15 575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho,Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013, 31 p.

ABNT_____. **NBR 15 575-2**: Edificações habitacionais – Desempenho,Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro, 2013, 31 p.

ABNT_____. **NBR 15 894-1**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Rio de Janeiro, 2010, 8 p.

ABNT_____. **NBR 15 894-2**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Rio de Janeiro, 2010, 3 p.

ABNT_____. **NBR 15 895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010, 6 p.

ABNT_____. **NBR NM 47:Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico.** Rio de Janeiro, 2002, 23 p.

ABNT_____. **NBR NM 67:Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998, 8 p.

ABREU, A. G. **Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante.**2004. 171p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

AL-AKHRAS, N. M. Durability of metakaolin to sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, n. 36,p. 1727-1734, 2006.

AMBROISE, J.; MAXIMILIEN, S.; PERA, J. Properties of metakaolin blended cements. **Advanced Cement Based Materials**, v. 1, n. 4, p 161-168, 1994.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. **Manual of Concrete Practice.** Part 1-1991. Materials and General Properties of Concret, Committee 222. Detroit, Michigan, 1991, 11p.

_____**ACI 201:** guide to durable concrete. ACI manual of concrete practice, part 1, 1992, 39p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete: **ASTM C 618**, 3p. *In:* Anual book of ASTM standards, Philadelphia, 1991.

_____. ASTM. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.**ASTM C 1202**, 1995.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.**São Paulo; Pini; 1992.

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

BAKKER, R. F. M. Initiation period. *In:*SCHIESSL, P. (Ed.)**Corrosion of steel concrete.**New York: RILEM / Chapman and Hall, p 22-55, 1988.

BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará:** Estudo de viabilidade técnica e econômica de produção do CAD com materiais disponíveis em Belém, através do emprego de adição de sílica ativa e metacaulim. 1998. 153 p. Dissertação(Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

BARATA, M. S.; DAL MOLIN, D. C. C. C. Avaliação preliminar do resíduo caulínico das indústrias de beneficiamento de caulim como matéria-prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa, *In:Revista Ambiente Construído*,v.2, n.1, Porto Alegre, 2002.

BARIN, D. S. **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) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - RS, Santa Maria, 2008.

BATIS, G.; PANTAZOPOULOU, P.; TSIVILIS, S.; BADOGIANNIS, E. The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars. **Cement & Concrete Composites**, n. 27, p. 125-130, 2005.

BATTAGIN, A. F. **Características das escórias e pozolanas aos cimentos Portland brasileiro**. In: CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE TECNOLOGIA DO CONCRETO, 4, p. 1-55, ABCP, São Paulo, 1987.

CADORE, W. W. **Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada**. 2008. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - RS, Santa Maria, 2008.

CALDARONE, M. A.; GRUBER, K. A.; BURG, R.G. High-reactivity metakaolin: A new generation mineral admixture. **Concrete International**, v. 16, n. 11, p. 37-40, 1994.

CARMO, J. B. M. **Análise comparativa do desempenho de concretos compostos com sílica ativa e metacaulim face à resistência mecânica e à viabilidade econômica**. 2006. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1 Ed. São Paulo: PINI, Goiânia: Editora UFG, 1997.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Ação da Carbonatação no Concreto**. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 Ed. São Paulo: IBRACON, cap.24, vol 1, p. 849-885, 2011.

CASTELLOTE, M.; FERNANDEZ, L.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations. **Materials and Structures**, v. 42, n. 4, p. 515-525, 2009.

CASTRO, A. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação**. 2003. 215p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

CASTRO, A.; FERREIRA, R. B.; LOPES, A. N. M.; CASCUDO, O.; CARASEK, H. Relationship between results of accelerated and natural carbonation in various concretes. In: **International RILEM Congress on use Recycled Materials in Buildings and Structures**, Barcelone, 2004.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETÓN - CEB. Durability of concrete structures CEB. Copenhagen, 1984, (Bulletin d'information, 152).

_____ CEB. Paris, 1989. (Bulletin d'information, 192).

_____ CEB-FIP model code 1990. Lausanne, 1991. 159p. (Bulletin d'information, 203).

_____ CEB. Durabilidad de estructuras de hormigón: guía de diseño CEB. Madrid, 1993. (GE-HO-CEB -Boletín 12).

CORDEIRO, G.C.; DÉsir, J.M.; VAILLANT, J.M.M.; FILHO, R.D.T. Caracterização de resíduo de tijolo cerâmico moído para uso como aditivo mineral em concretos e argamassas. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 44, 2002. **Anais...**, Belo Horizonte, 2002.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições Minerais para Concreto Estrutural**. In: ISAIA, G.C. (Ed.) **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, cap.12, vol 1, p.345-379, 2005.

DALLA LANA, E. F. **Carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com cinza volante e cal.**2005. 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - RS, Santa Maria, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL- DNPM, Sumário Mineral, Brasília, 2008.

DUAN, P.; SHUI, Z.; CHEN, W.; SHEN, C. Influence of metakaolion pore structure-related properties and thermodynamic stability of hydrate phases of concrete in seawater environment. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 947-953, 2012.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição.** 2013. 192p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

FIGUEIREDO, C. D. P. **O papel do metacaulino na proteção do betão contra a ação dos cloretos.** 2001. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Portugal, 2011.

GALVÃO, S. P. **Avaliação do desempenho de argamassas de reparo estrutural à base de cimento Portland modificadas por polímeros e contendo adições minerais.** 2004. 210 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2004.

GARDOLINSKI, J. E.; MARTINS FILHO, H. P.; WYPYCH, F. Comportamento térmico da caulinita hidratada. Departamento de Química da Universidade Federal do Paraná, Curitiba. **Quimica Nova**, v.26,n.1, p.30-35, 2003.

GERVAIS, C.; GARRABRANTS, A. C.; SANCHEZ, F. The effects of carbonation and drying during intermittent leaching on the release of inorganic constituents from a cement-based matrix. **Cement and Concrete Research**, vol. 34, n. 1, p. 119-131, 2004.

GLASSER, F. P.; MATSCHEI. Interactions between Portland cement and carbon dioxide. 12th International Congress on the Chemistry of Cement. **Anais...** Montreal, 2007.

GLEIZE, P. J. P.; CYR M.; ESCADEILLAS, G. Effects of Metakaolin on Autogenous Shrinkage of Cements Pastes. **Cement & Concrete Research**, vol. 29, p. 80-87, 2007.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado.** 1. ed. São Paulo: Pini, 46 p, 1986.

HOLANDA, A. B. **Novo Dicionário Eletrônico Aurélio – versão 5.11.a.** 3 Edição. Editora Positivo Informática Ltda, 2008.

HOPPE, A. E. **Carbonatação de concretos com cinza de casca de arroz sem moagem.** 2008. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - RS, Santa Maria, 2008.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** 2008. 247p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, vol. 32, n. 12, p. 1923-1930, 2002.

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste. **Cement and Concrete Research**, vol. 24, p. 1165-1176, 1994.

HYVERT, N. **Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués em béton**. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2009.

ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. 1995. 280p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ISHIDA, T.; MAEKAWA, K. **Modeling of pH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory**. Translation from proceedings of JSCE n°.648, v. 47, May 2000. (<disponível em: http://concrete.t.u-tokyo.ac.jp/en/demos/ducom/brieftheory/Clib_JSCE_pH.pdf, acesso em 27/08/2013>).

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

KAZMIERCZAK, C. S.; ZARA, L. Comparação entre metodologias utilizadas para a determinação da profundidade de carbonatação em argamassas. *In*. INTERNETIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1996, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 1996. p. 402-413.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 199p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LEA, F. M. **The Chemistry of Cement and Concrete**. 3^a ed. London: Edward Arnold (Publishers), 1970.

MARTINELLI JÚNIOR, L. A. **Carbonatação natural de protótipos de concretos com cinza de casca de arroz**. 2010. 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - RS, Santa Maria, 2010.

MEDEIROS, M. H. F.; GOBBI, A.; GROENWOLD, J. A.; HELENE, P. Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, n. 66, p. 59-65, 2013.

MEHTA, P.K.; MALHOTRA, V.M. Pozzolanic and cementitious materials. **Advances Concrete Technology**, v. 1, Gordon and Breach Publishers, 191p, 1996.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. Trad. Nicole Hasparyk, Paulo Helene, Vladimir Paulon. 3^a ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MENDES, M. V. A. S. **Avaliação das propriedades de transporte de massa em concretos contendo adições minerais**. 2009. 201 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato**. 2007. 189p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

- NASCIMENTO, R. M. do. **Estudo da aditivação de metacaulim de alta reatividade, produzido por meio do método de calcinação flash em cimento Portland.** 2009. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- NEVILLE, A. M., **Propriedades do concreto.** Trad.: Salvador Giamusso, 2ª ed. São Paulo: PINI, 1997.
- NGALA, V. T.; PAGE, C. L. Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 7, p. 995-1007, 1997.
- OLIVEIRA, A.M. **Avaliação do desempenho de concretos com adições minerais quanto à corrosão das armaduras induzida por cloretos.** 2007. 276 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.
- OLIVEIRA, C. A. S. **Avaliação microestrutural e comportamento físico e mecânico de concretos de alto desempenho produzidos com metacaulim.** 2007. 214p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- PAPADAKIS, V.G.; VAYENAS, C.G.; FARDIS, M.N. A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation. **AIChE Journal**, v. 35, n. 10, p.1639-1650, 1989.
- PAPADAKIS, V.G.; VAYENAS, C.G.; FARDIS, M.N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, n. 88, p.363-373, 1991.
- PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação.** 2004. 178p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia Civil, 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. 285p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- PERA, J.; AMROUZ, A. Development of highly reactive metakaolin from paper sludge. **Advanced Cement Based Materials**, n. 7, p 49-56, 1998.
- PETER, M. A.; MUNTEAN, A; MEIER, S. A; BÖHM, M. Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 12, p. 1385-1393, 2008.
- PINA, F. B. C. **Resistência à carbonatação de argamassas de reparação para estruturas em betão armado.** 2009. 118 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.
- POON, C.S.; KOU, S.C.; LAM, L. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. **Construction and Building Materials**, n. 20, p. 858-865, 2006.
- POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado.** 2004. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 265p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PRICE, Walter H. **Pozolanas: uma revisão**. *In*: Coletânea de trabalhos sobre pozolanas e cimentos pozolânicos. ABCP. São Paulo, 1981. 17p.

RAMLOCHAN, T.; THOMAS, M.; GRUBER, K.A. The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete. **Cement and Concrete Research**, n.30,p.339-344, 2000.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET DE RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX ET LES CONSTRUCTIONS - RILEM. Measurement of hardened concrete carbonation depth: RILEM Recommendation CPC-18. **Materials and Structures**, p. 453-455, 1988.

_____. RILEM. Recommendations of TC 116-PCD. Tests for gas permeability of concrete. **Materials and Structures**, v. 32, n. 217, 1999.

ROCHA, G. G. N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. 2005. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

ROSSIGNOLO, J. A.; OLIVEIRA, I. L. Concreto leve estrutural com metacaulim. **Minerva Pesquisa e Tecnologia**, n. 3, p. 177-187, 2006.

ROUGEAU, P. Les résultats d'essais croisés AFREM: "Essai de carbonation accélérée". **Comptes-Rendu des Journées Techniques – AFPC-AFREM DURABILITE DES BETONS**, Méthodes recommandées pour La mesure des grandeurs associées à La durabilité. p. 87-103. Toulouse, 1997.

ROY, S. K.; POH, K.B.; NORTHWOOD, D. O. Durability of concrete-accelerated carbonation and weathering studies. **Building and Environment**, v. 34, n. 5, p. 597-606, 1999.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 6, p. 441-454, 2001.

SAETTA, A. V.; SCHREFLER, B. A.; VITALIANI, R. V. 2-D model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 8, p. 1703-1712, 1995.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. Editora Edgard Blücher Ltda, 2ª Edição, Volumes 1 e 3, 1992.

SANTOS, F. B.; MONTEIRO, G.A.; SILVA JUNIOR, W. **O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria dos cloretos**. 2012. 141p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

SHUTTER, G. D.; AUDENAERT, K. Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration. **Materials and Structures**, v. 37, p. 591-596, 2004.

SIDDIQUE, R. **Waste materials and by-products in concrete**. 1 ed. Berlim: Springer, cap. 2, p. 41-92, 2008. 414 p.

- SILVA, M. G. **Cimentos Portland com adições minerais.** In: ISAIA, G. C. (Ed.) *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.* São Paulo: Ibracon, cap.25, vol. 1, p. 791-823, 2010.
- SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Estudo da viabilidade do uso de argilas calcinadas, como metacaulim de alta reatividade (MCAR). **Revista Engenharia Civil**, n. 15, p. 45-54, Universidade do Minho, Portugal, 2002.
- SOUZA, P. S. L. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência.** 2003. 203p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- SPERB, J. E. K. **Carbonatação e absorção capilar de concretos com adições minerais e ativadores químicos.** 2003. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - RS, Santa Maria, 2003.
- STUMPP, M. J. **Carbonatação de concretos com altos teores de adições minerais e cal hidratada.** 2003. 162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - RS, Santa Maria, 2003.
- TAVARES, L. R. C. **Avaliação da retração autógena em concretos de alto desempenho com diferentes adições.** 2008. 107 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- THIÉRY, M. **Modélisation de la carbonation atmosphérique des bétons - Prise en compte des effets cinétiques et de l'état hydrique.** 2005. 347 f. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2005.
- THIÉRY, M.; VILLAIN, G.; DANGLA, P.; PLATRET, G. Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: effects of the chemical kinetics. **Cement and Concrete Research**, vol. 37, n. 7, p. 1047-1058, 2007.
- TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho.** In: ISAIA, G. C. (Ed.) *Concreto: Ciência e Tecnologia.* 1 Ed. São Paulo: IBRACON, cap.36, vol.2, p. 1283-1325, 2011.
- TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete.** Stockholm: Swedish Cement and Concrete, Research Institute, 1982.
- UOMOTO, T.; TAKADA, Y. Factors affecting concrete carbonation rate. DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 6th. **Proceedings...** E. & F.N. SPON. S. Nagataki, T. Nireki and F. Tomosawa, 1993.
- VAGHETTI, M. A. O. **Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais.** 2005. 286p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- VENQUIARUTO, S. D. **A influência da finura e do teor de adições minerais na carbonatação do concreto.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - RS, Santa Maria, 2002.
- WOLF, J.; DAL MOLIN, D.C. C. Carbonatação de argamassas e concretos: fatores intervenientes. In: SIMPÓSIO SOBRE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES: PREVENÇÃO E RECUPERAÇÃO. **Anais...**, p. 118-133, UFRS, Porto Alegre, 1989.
- WYPYCH, F.; SATYANARAYANA, K.G. Clay Surfaces - Fundamentals and applications. **Academic Press**, Amsterdam, 2004.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas.** 1989. 191 p. Dissertação (Mestrado em Geociências)- Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

ZAMPIERI, V. A. **Cimento Portland Aditivado com Pozolanas de Argilas Calcinadas: Fabricação, Hidratação e Desempenho Mecânico.** 1993.233 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

ZHANG, M.H.; MALHOTRA, V.M. Characteristics of thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 8, p. 1713-1725, 1995.

**APÊNDICE A – ESTUDO PARA DETERMINAÇÃO DA
RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE DOS CONCRETOS DO
SEGUNDO GRUPO**

Tabela A.1- Resultados individuais de resistência à compressão para o estudo da relação a/ag do concreto 10F do segundo grupo.

Estudo de traços - relação a/ag				Concreto - 10F									
Φ do CP (cm): 10													
IDADE(dias)	Resist./ CP's	R a/ag: 0,60			10F65 a/ag: 0,65			10F70 a/ag: 0,70			10F75 a/ag: 0,75		
		CR (kgf)	CR _m (kgf)	f _{cm} (MPa)	CR (kgf)	CR _m (kgf)	f _{cm} (MPa)	CR (kgf)	CR _m (kgf)	f _{cm} (MPa)	CR (kgf)	CR _m (kgf)	f _{cm} (MPa)
03	CP1	24450	23953,3	29,92	13910	14673,3	18,33	12170	12030,0	15,03	9480	9896,7	12,36
	CP2	22910			15570			12040			9790		
	CP3	24500			14540			11880			10420		
07	CP1	27230	29516,7	36,87	20760	21703,3	27,11	17910	17770,0	22,20	14950	14610,0	18,25
	CP2	29510			22280			17800			13850		
	CP3	31810			22070			17600			15030		
14	CP1	-	-	-	25230	25606,7	31,98	23310	21686,7	27,09	19950	19073,3	23,82
	CP2	-			26000			19780			19730		
	CP3	-			25590			21970			17540		
28	CP1	32880	33983,3	42,45		-	-		-	-		-	-
	CP2	35200											
	CP3	33870											
56	CP1	35550	36983,3	46,19		-	-		-	-		-	-
	CP2	38460											
	CP3	36940											
Equ. do gráfico		y = 5,2968ln(x) + 25,082			y = 8,9199ln(x) + 8,9077			y = 7,8531ln(x) + 6,5586			y = 7,4228ln(x) + 4,0819		
91	Projeção	-	-	48,98	-	-	49,14	-	-	41,98	-	-	37,57

Obs.: CP – Corpo de prova; CR- Carga de ruptura; CR_m – Carga de ruptura média; f_{cm} – Resistência à compressão média.

Figura A.1- Gráfico idade x resistência do concreto de referência para estudo do concreto 10F.

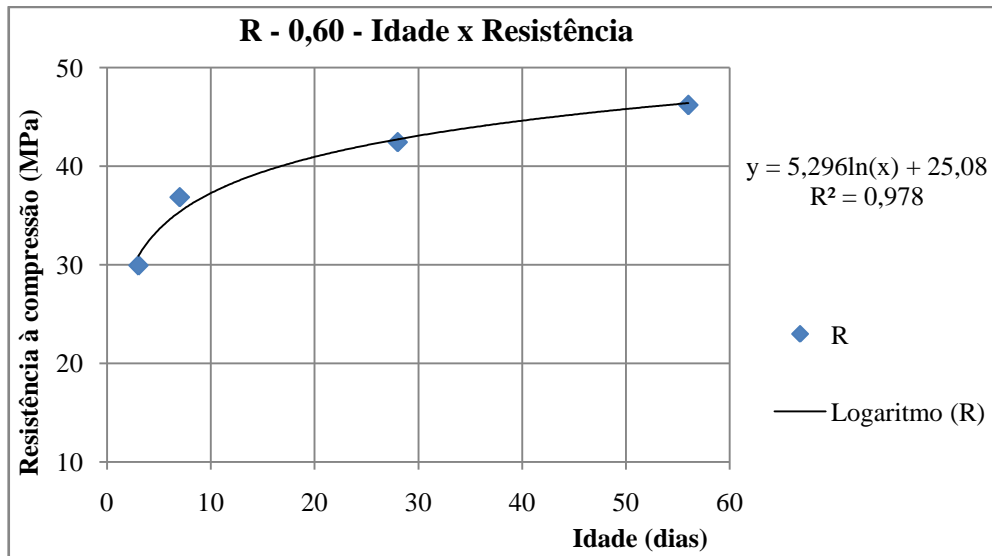


Figura A.2- Gráfico idade x resistência para as relações a/ag estudadas do concreto 10F.

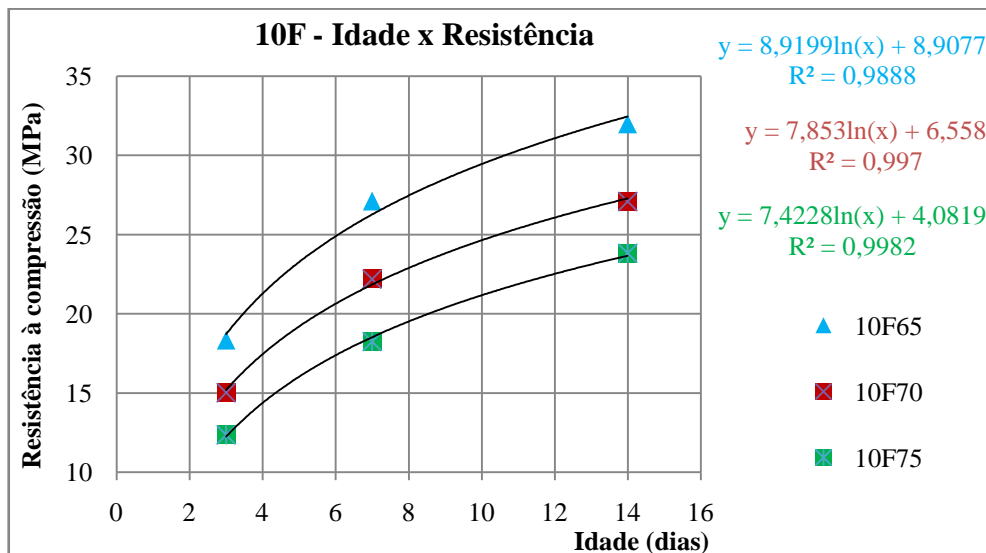


Tabela A.2- Cálculo das projeções de resistências do concreto 10F aos 28 e 91 dias.

Concreto	Rel. a/ag	Equação da curva	Resistência média (projetada)	
			28 dias	91 dias
R	0,60	$y = 5,2968\ln(x) + 25,082$	42,73	48,98
10F65	0,65	$y = 8,9199\ln(x) + 8,9077$	38,63	49,14
10F70	0,70	$y = 7,8531\ln(x) + 6,5586$	32,73	41,98
10F75	0,75	$y = 7,4228\ln(x) + 4,0819$	28,82	37,57

Figura A.3- Gráfico resistência projetada aos 91 dias x relação a/ag do concreto 10F.

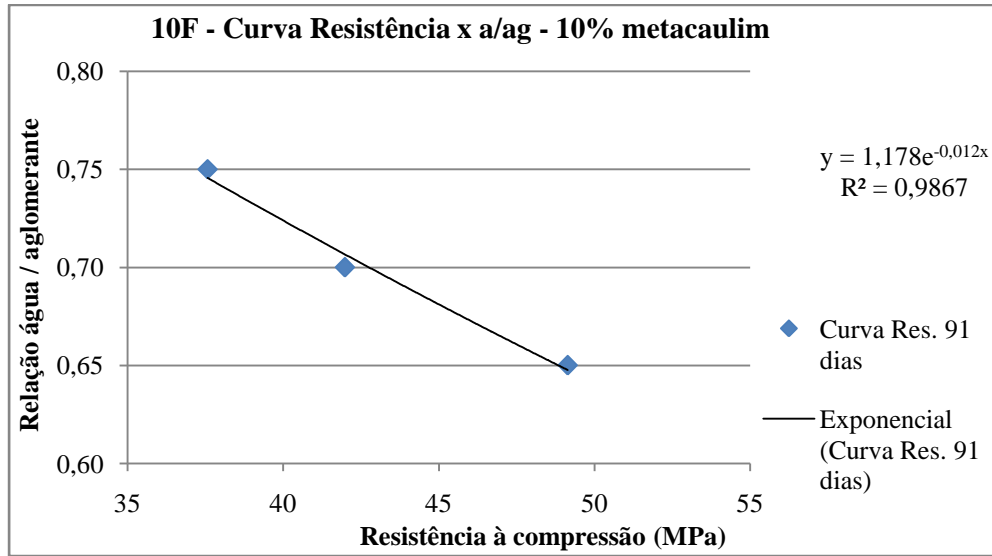


Tabela A.3- Cálculo da relação a/ag do concreto 10F para resistência projetada aos 91 dias.

Projeção	Rmédio			
Curva de resistência aos 91 dias - 10% metacaulim				
Idade	R 0,60	0,65	0,70	0,75
91	48,98	49,14	41,98	37,57
Curva de tendência da relação a/ag em função da resistência projetada: $y = 1,178e^{-0,012x}$				
Cálculo da relação a/ag para a mesma resistência do concreto R aos 91 dias= 0,654				

Tabela A.4- Resultados individuais de resistência à compressão para o estudo da relação a/ag do concreto 15F do segundo grupo.

Estudo de traços - relação a/ag				Concreto - 15F									
Φ do CP (cm): 10													
IDADE(dias)	Resist./ CP's	R a/ag: 0,60			15F65 a/ag: 0,65			15F70 a/ag: 0,70			15F75 a/ag: 0,75		
		CR (kgf)	CR _m (kgf)	f _{cm} (MPa)	CR (kgf)	CR _m (kgf)	f _{cm} (MPa)	CR (kgf)	CR _m (kgf)	f _{cm} (MPa)	CR (kgf)	CR _m (kgf)	f _{cm} (MPa)
03	CP1	24450	23953,3	29,92	14910	16036,67	20,03	12880	13280,00	16,59	11760	11533,33	14,41
	CP2	22910			17200			13070			11300		
	CP3	24500			16000			13890			11540		
07	CP1	27230	29516,7	36,87	23300	23900	29,85	21680	21650	27,04	17540	17883,33	22,34
	CP2	29510			24050			21680			17710		
	CP3	31810			24350			21590			18400		
14	CP1	-	-	-	29200	30446,67	38,03	25230	25590	31,96	22190	21620	27,00
	CP2	-			29510			25120			21260		
	CP3	-			32630			26420			21410		
28	CP1	32880	33983,3	42,45		-	-		-	-		-	-
	CP2	35200											
	CP3	33870											
56	CP1	35550	36983,3	46,19		-	-		-	-		-	-
	CP2	38460											
	CP3	36940											
Equ. do gráfico		y = 5,2968ln(x) + 25,082			y = 8,9199ln(x) + 8,9077			y = 7,8531ln(x) + 6,5586			y = 7,4228ln(x) + 4,0819		
91	Projeção	-	-	48,98	-	-	59,87	-	-	51,54	-	-	42,76

Obs.: CP – Corpo de prova; CR- Carga de ruptura; CR_m – Carga de ruptura média; f_{cm} – Resistência à compressão média.

Figura A.4- Gráfico idade x resistência do concreto de referência para estudo do concreto 15F.

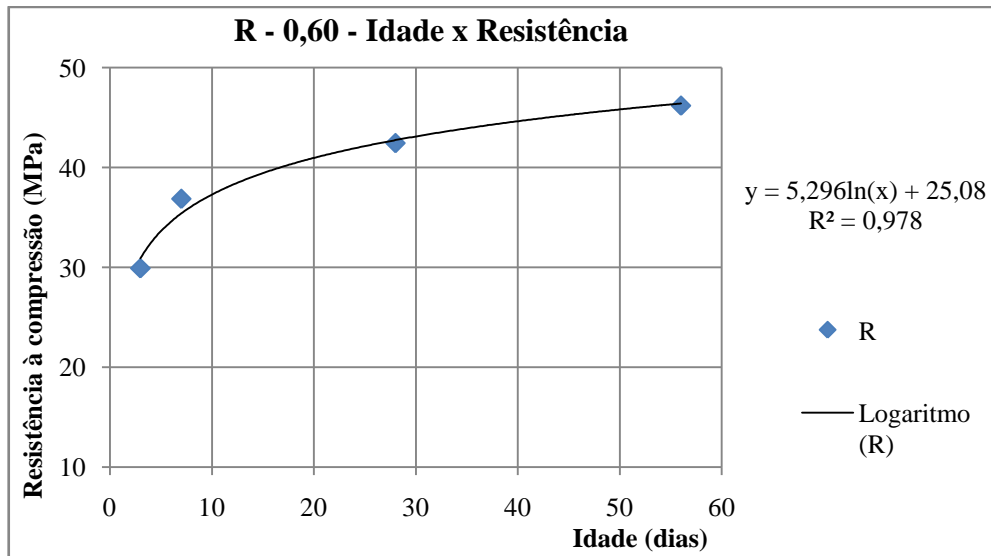


Figura A.5- Gráfico idade x resistência para as relações a/ag estudadas do concreto 15F.

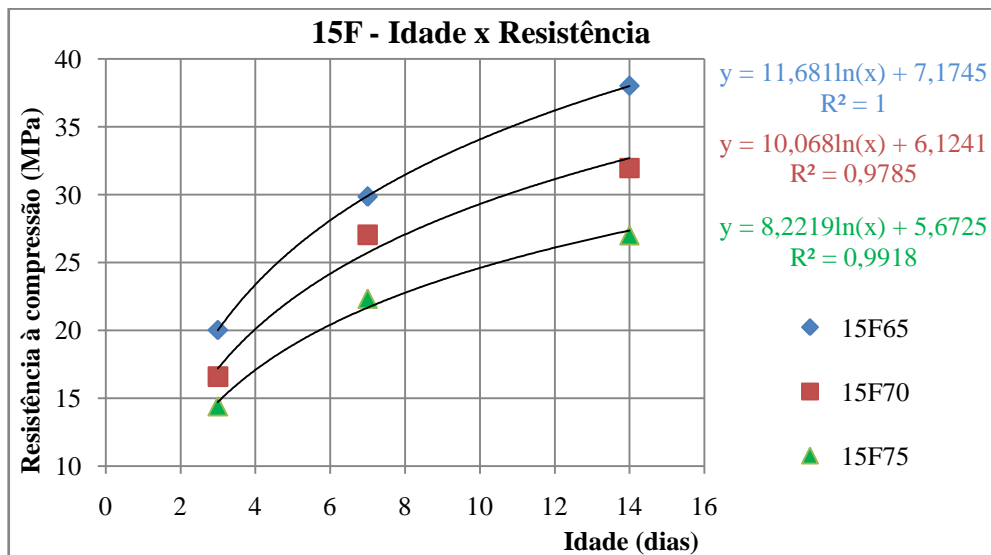


Tabela A.5- Cálculo das projeções de resistências do concreto 15F aos 28 e 91 dias.

Concreto	Rel. a/ag	Equação da curva	Resistência média (projetada)	
			28 dias	91 dias
R	0,60	$y = 5,2968\ln(x) + 25,082$	42,73	48,98
15F65	0,65	$y = 11,681\ln(x) + 7,1745$	46,10	59,87
15F70	0,70	$y = 10,068\ln(x) + 6,1241$	39,67	51,54
15F75	0,75	$y = 8,2219\ln(x) + 5,6725$	33,07	42,76

Figura A.6- Gráfico resistência projetada aos 91 dias x relação a/ag do concreto 15F.

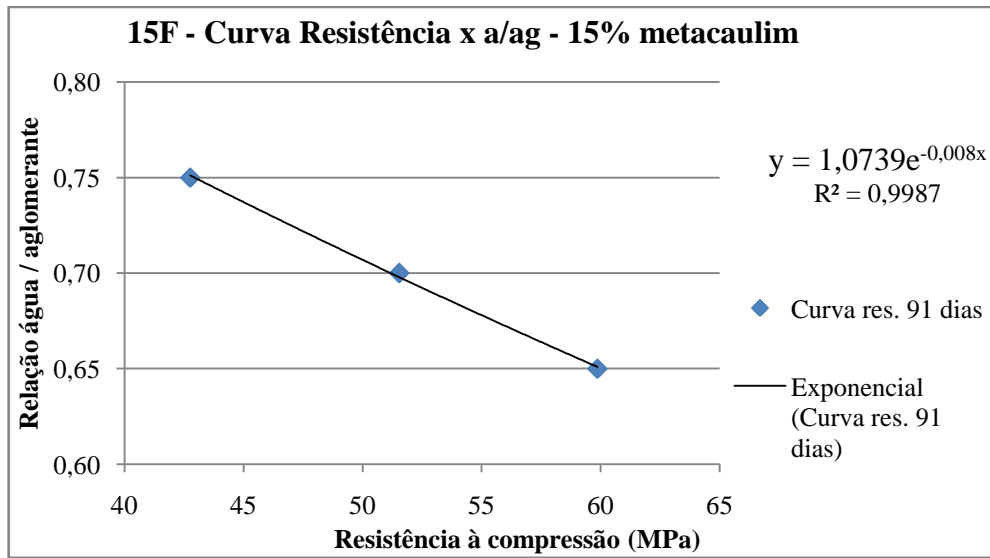


Tabela A.6- Cálculo da relação a/ag do concreto 15F para resistência projetada aos 91 dias.

Projeção	Rmédio			
Curva de resistência aos 91 dias - 10% metacaulim				
Idade	R 0,60	0,65	0,70	0,75
91	48,98	59,87	51,54	42,76
Curva de tendência da relação a/ag em função da resistência projetada: $y = 1,0739e^{-0,008x}$				
Cálculo da relação a/ag para a mesma resistência do concreto R aos 91 dias = 0,726				

Tabela A.7- Resultados individuais de resistência à compressão para o estudo da relação a/ag do concreto 20F do segundo grupo.

Estudo de traços - relação a/ag				Concreto - 20F									
Φ do CP (cm): 10													
IDADE(dias)	Resist./ CP's	R a/ag: 0,60			20F65 a/ag: 0,65			20F70 a/ag: 0,70			20F75 a/ag: 0,75		
		CR (kgf)	CR _m (kgf)	f _{cm} (MPa)	CR (kgf)	CR _m (kgf)	f _{cm} (MPa)	CR (kgf)	CR _m (kgf)	f _{cm} (MPa)	CR (kgf)	CR _m (kgf)	f _{cm} (MPa)
03	CP1	24450	23953,3	29,92	13970	15420	19,26	14380	14986,67	18,72	11780	12230,00	15,28
	CP2	22910			17150			15370			12570		
	CP3	24500			15140			15210			12340		
07	CP1	27230	29516,7	36,87	26550	25566,67	31,93	24330	23390	29,22	20980	20106,67	25,11
	CP2	29510			24830			22900			19210		
	CP3	31810			25320			22940			20130		
14	CP1	-	-	-	28910	29253,33	36,54	26490	26843,33	33,53	22230	23446,67	29,29
	CP2	-			29430			25850			23810		
	CP3	-			29420			28190			24300		
28	CP1	32880	33983,3	42,45		-	-		-	-		-	-
	CP2	35200											
	CP3	33870											
56	CP1	35550	36983,3	46,19		-	-		-	-		-	-
	CP2	38460											
	CP3	36940											
Equ. do gráfico		y = 5,2968ln(x) + 25,082			y = 8,9199ln(x) + 8,9077			y = 7,8531ln(x) + 6,5586			y = 7,4228ln(x) + 4,0819		
91	Projeção	-	-	48,98	-	-	58,95	-	-	52,57	-	-	47,26

Obs.: CP – Corpo de prova; CR- Carga de ruptura; CR_m – Carga de ruptura média; f_{cm} – Resistência à compressão média.

Figura A.7- Gráfico idade x resistência do concreto de referência para estudo do concreto 20F.

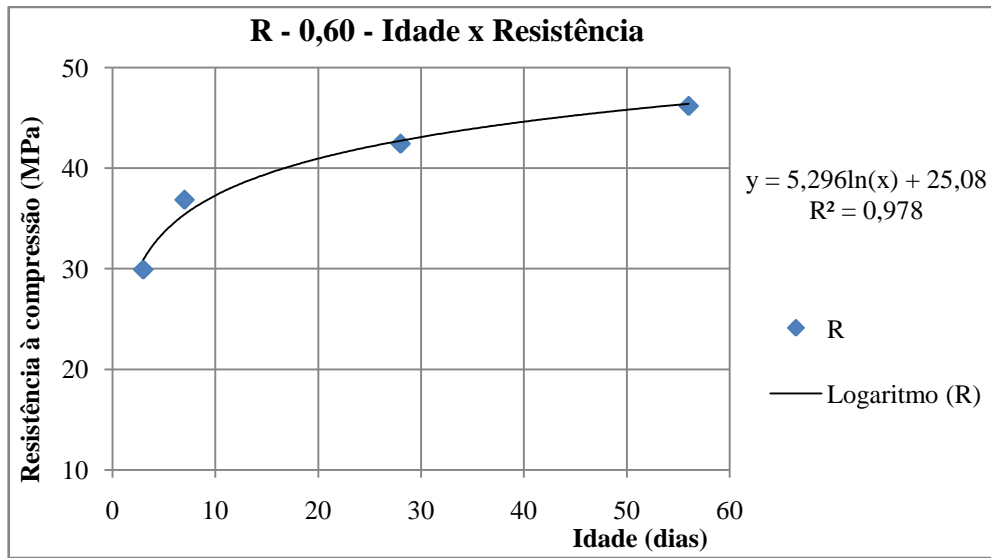


Figura A.8- Gráfico idade x resistência para as relações a/ag estudadas do concreto 20F.

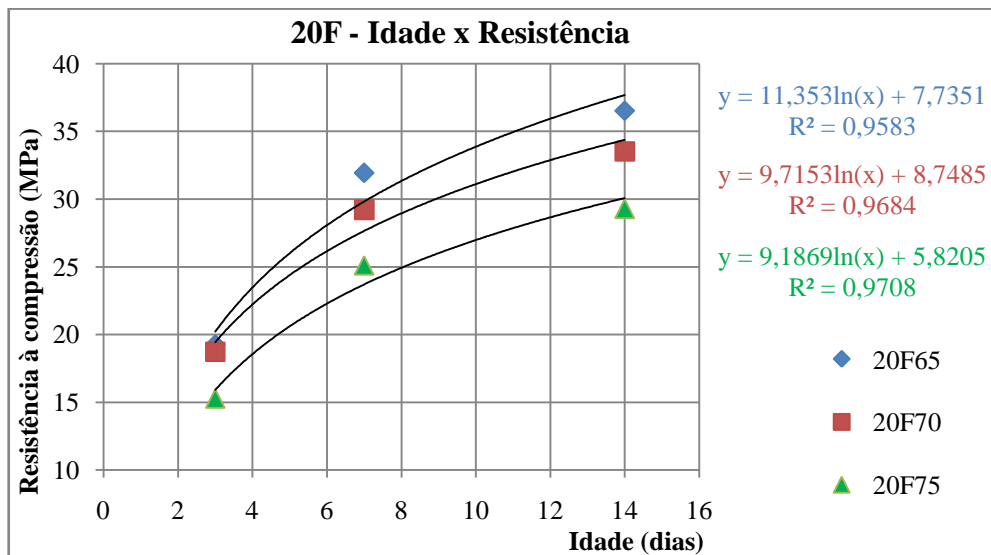


Tabela A.8- Cálculo das projeções de resistências do concreto 20F aos 28 e 91 dias.

Concreto	Rel. a/ag	Equação da curva	Resistência média (projetada)	
			28 dias	91 dias
R	0,60	$y = 5,2968\ln(x) + 25,082$	42,73	48,98
20F65	0,65	$y = 11,353\ln(x) + 7,7351$	45,57	58,95
20F70	0,70	$y = 9,7153\ln(x) + 8,7485$	41,12	52,57
20F75	0,75	$y = 9,1869\ln(x) + 5,8205$	36,43	47,26

Figura A.9- Gráfico resistência projetada aos 91 dias x relação a/ag do concreto 20F.

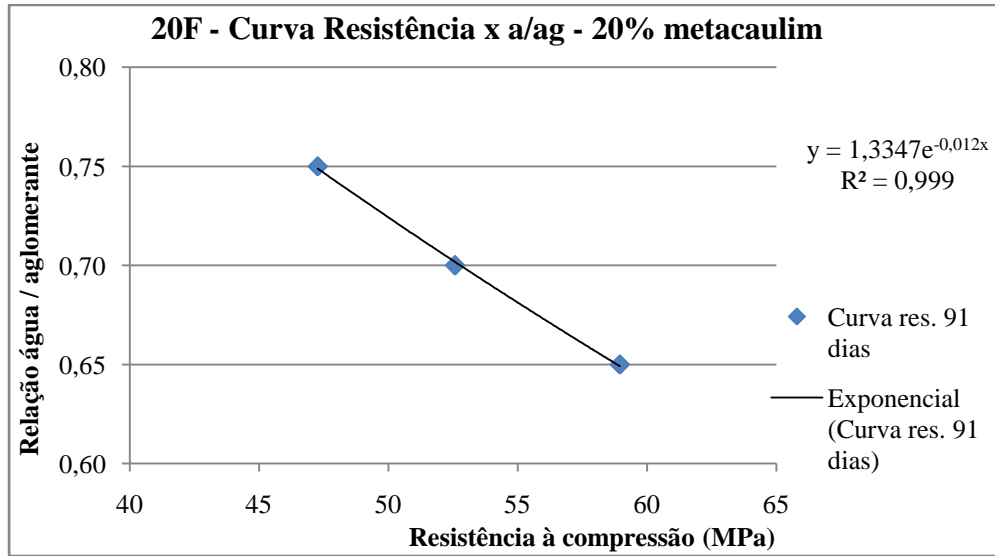


Tabela A.9- Cálculo da relação a/ag do concreto 15F para resistência projetada aos 91 dias.

Projeção	Rmédio			
Curva de resistência aos 91 dias - 10% metacaulim				
Idade	R 0,60	0,65	0,70	0,75
91	48,98	58,95	52,57	47,26
Curva de tendência da relação a/ag em função da resistência projetada: $y = 1,3347e^{-0,012x}$				
Cálculo da relação a/ag para a mesma resistência do concreto R aos 91 dias = 0,741				

**APÊNDICE B – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO e ABSORÇÃO DE ÁGUA
POR IMERSÃO.**

Tabela B.1- Dados de resistência à compressão axial em concretos com 3dias de cura úmida submersa.

IDADE = 3 dias		Data rompimento: 07/07/2012			Resistências(MPa)	
Concreto	Carga (kgf)	Carga (N)	Área (mm ²)	Fc ₃ (MPa)	Fc ₃ médio	Fc ₃ máximo
R -02	24450	239854,5	7853,98	30,54	29,92	30,60
R -03	22910	224747,1	7853,98	28,62		
R -04	24500	240345	7853,98	30,60		
12A -06	22230	218076,3	7853,98	27,77	28,14	28,68
12A -05	22960	225237,6	7853,98	28,68		
12A -14	22390	219645,9	7853,98	27,97		
IDADE = 3 dias		Data rompimento: 14/07/2012				
10A -02	21190	207873,9	7853,98	26,47	25,50	26,47
10A -04	20180	197965,8	7853,98	25,21		
10A -05	19870	194924,7	7853,98	24,82		
15A -01	18260	179130,6	7853,98	22,81	24,98	26,09
15A -02	20890	204930,9	7853,98	26,09		
15A -06	20840	204440,4	7853,98	26,03		
IDADE = 3 dias		Data rompimento: 16/07/2012				
17A -03	22030	216114,3	7853,98	27,52	27,70	27,82
17A -07	22230	218076,3	7853,98	27,77		
17A -10	22270	218468,7	7853,98	27,82		
20A -03	23010	225728,1	7853,98	28,74	27,75	28,74
20A -04	21110	207089,1	7853,98	26,37		
20A -06	22520	220921,2	7853,98	28,13		
IDADE = 3 dias		Data rompimento: 06/09/2012				
10F -04	18540	181877,4	7853,98	23,16	22,84	23,16
10F -07	18040	176972,4	7853,98	22,53		
10F -08	18270	179228,7	7853,98	22,82		
15F -01	14490	142146,9	7853,98	18,10	18,89	19,52
15F -02	15630	153330,3	7853,98	19,52		
15F -06	15250	149602,5	7853,98	19,05		
20F -04	13090	128412,9	7853,98	16,35	17,12	17,87
20F -06	13710	134495,1	7853,98	17,12		
20F -17	14310	140381,1	7853,98	17,87		

Tabela B.2- Dados de resistência à compressão axial em concretos com 7 dias de cura úmida submersa.

IDADE = 7 dias		Data rompimento: 11/07/2012			Resistências(MPa)	
Concreto	Carga (kgf)	Carga (N)	Área (mm ²)	Fc ₇ (MPa)	Fc ₇ médio	Fc ₇ máximo
R -01	27230	267126,3	7853,98	34,01	36,87	39,73
R -08	29510	289493,1	7853,98	36,86		
R -09	31810	312056,1	7853,98	39,73		
12A -01	32280	316666,8	7853,98	40,32	39,60	40,32
12A -02	31610	310094,1	7853,98	39,48		
12A -18	31220	306268,2	7853,98	39,00		
IDADE = 7 dias		Data rompimento: 18/07/2012				
10A -08	34380	337267,8	7853,98	42,94	44,04	45,65
10A -13	34850	341878,5	7853,98	43,53		
10A -16	36550	358555,5	7853,98	45,65		
15A -04	33520	328831,2	7853,98	41,87	43,22	46,09
15A -05	36900	361989,0	7853,98	46,09		
15A -15	33380	327457,8	7853,98	41,69		
IDADE = 7 dias		Data rompimento: 20/07/2012				
17A -04	32650	320296,5	7853,98	40,78	40,80	43,03
17A -08	30900	303129,0	7853,98	38,60		
17A -09	34450	337954,5	7853,98	43,03		
20A -05	31780	311761,8	7853,98	39,69	41,31	42,33
20A -07	33890	332460,9	7853,98	42,33		
20A -08	33550	329125,5	7853,98	41,91		
IDADE = 7 dias		Data rompimento: 10/09/2012				
10F -02	25110	246329,1	7853,98	31,36	31,40	31,80
10F -03	25460	249762,6	7853,98	31,80		
10F -06	24840	243680,4	7853,98	31,03		
15F -03	20190	198063,9	7853,98	25,22	24,49	25,22
15F -09	19640	192668,4	7853,98	24,53		
15F -15	18980	186193,8	7853,98	23,71		
20F -02	21190	207873,9	7853,98	26,47	27,13	28,39
20F -05	21250	208462,5	7853,98	26,54		
20F -18	22730	222981,3	7853,98	28,39		

Tabela B.3- Dados de resistência à compressão axial em concretos com 28dias de cura úmida submersa.

IDADE = 28 dias		Data rompimento: 01/08/2012			Resistências(MPa)	
Concreto	Carga (kgf)	Carga (N)	Área (mm ²)	F _{c28} (MPa)	F _{c28médio}	F _{c28máximo}
R -06	32880	322552,8	7853,98	41,07	42,45	43,97
R -07	35200	345312	7853,98	43,97		
R -10	33870	332264,7	7853,98	42,31		
12A -07	38790	380529,9	7853,98	48,45	45,77	48,45
12A -08	33880	332362,8	7853,98	42,32		
12A -12	37270	365618,7	7853,98	46,55		
IDADE = 28 dias		Data rompimento: 08/08/2012				
10A -01	34570	339131,7	7853,98	43,18	45,72	50,21
10A -03	40200	394362	7853,98	50,21		
10A -07	35030	343644,3	7853,98	43,75		
15A -03	39880	391222,8	7853,98	49,81	50,81	53,06
15A -07	39670	389162,7	7853,98	49,55		
15A -08	42480	416728,8	7853,98	53,06		
IDADE = 28 dias		Data rompimento: 10/08/2012				
17A -13	35580	349039,8	7853,98	44,44	47,91	51,87
17A -14	37970	372485,7	7853,98	47,43		
17A -15	41530	407409,3	7853,98	51,87		
20A -09	42320	415159,2	7853,98	52,86	51,77	52,86
20A -10	40850	400738,5	7853,98	51,02		
20A -10	41180	403975,8	7853,98	51,44		
IDADE = 28 dias		Data rompimento: 01/10/2012				
10F -01	28270	277328,7	7853,98	35,31	35,74	36,10
10F -05	28660	281154,6	7853,98	35,80		
10F -12	28900	283509	7853,98	36,10		
15F -04	20900	205029	7853,98	26,11	27,43	29,80
15F -13	23860	234066,6	7853,98	29,80		
15F -14	21120	207187,2	7853,98	26,38		
20F -01	25430	249468,3	7853,98	31,76	30,21	31,76
20F -10	24430	239658,3	7853,98	30,51		
20F -16	22690	222588,9	7853,98	28,34		

Tabela B.4- Dados de resistência à compressão axial em concretos com 56dias de cura úmida submersa.

IDADE = 56 dias		Data rompimento: 29/08/2012			Resistências(MPa)	
Concreto	Carga (kgf)	Carga (N)	Área (mm ²)	Fc ₅₆ (MPa)	Fc ₅₆ médio	Fc ₅₆ máximo
R -11	35550	348745,5	7853,98	44,40	46,19	48,04
R -14	38460	377292,6	7853,98	48,04		
R -15	36940	362381,4	7853,98	46,14		
12A -10	34210	335600,1	7853,98	42,73	46,15	50,72
12A -11	36030	353454,3	7853,98	45,00		
12A -16	40610	398384,1	7853,98	50,72		
IDADE = 56 dias		Data rompimento: 05/09/2012				
10A -11	37740	370229,4	7853,98	47,14	48,50	50,34
10A -12	40300	395343	7853,98	50,34		
10A -14	38450	377194,5	7853,98	48,03		
15A -09	44280	434386,8	7853,98	55,31	53,80	55,31
15A -17	41870	410744,7	7853,98	52,30		
15A -18	43070	422516,7	7853,98	53,80		
IDADE = 56 dias		Data rompimento: 07/09/2012				
17A -06	43010	421928,1	7853,98	53,72	51,44	53,72
17A -12	39060	383178,6	7853,98	48,79		
17A -17	41480	406918,8	7853,98	51,81		
20A -02	38290	375624,9	7853,98	47,83	51,75	56,14
20A -12	41050	402700,5	7853,98	51,27		
20A -16	44950	440959,5	7853,98	56,14		
IDADE = 56 dias		Data rompimento: 29/10/2012				
10F -10	31160	305679,6	7853,98	38,92	38,52	38,92
10F -14	31110	305189,1	7853,98	38,86		
10F -15	30250	296752,5	7853,98	37,78		
15F -08	26510	260063,1	7853,98	33,11	31,69	33,11
15F -11	25420	249370,2	7853,98	31,75		
15F -12	24190	237303,9	7853,98	30,21		
20F -03	25380	248977,8	7853,98	31,70	31,57	33,09
20F -07	23950	234949,5	7853,98	29,91		
20F -08	26490	259866,9	7853,98	33,09		

Tabela B.5- Dados de resistência à compressão axial em concretos com 91 dias de cura úmida submersa.

IDADE = 91 dias		Data rompimento: 03/10/2012			Resistências(MPa)	
Concreto	Carga (kgf)	Carga (N)	Área (mm ²)	F _{c91} (MPa)	F _{c91} médio	F _{c91} máximo
R -12	39830	390732,3	7853,98	49,75	47,09	49,75
R -13	37130	364245,3	7853,98	46,38		
R -17	36150	354631,5	7853,98	45,15		
12A -03	40750	399757,5	7853,98	50,90	50,94	53,57
12A -13	38720	379843,2	7853,98	48,36		
12A -17	42890	420750,9	7853,98	53,57		
IDADE = 91 dias		Data rompimento: 10/10/2012				
10A -09	40250	394852,5	7853,98	50,27	50,77	54,28
10A -10	43460	426342,6	7853,98	54,28		
10A -18	38220	374938,2	7853,98	47,74		
15A -11	37350	366403,5	7853,98	46,65	48,40	50,12
15A -12	40130	393675,3	7853,98	50,12		
15A -13	38770	380333,7	7853,98	48,43		
IDADE = 91 dias		Data rompimento: 12/10/2012				
17A -05	40850	400738,5	7853,98	51,02	53,81	55,78
17A -11	44660	438114,6	7853,98	55,78		
17A -16	43740	429089,4	7853,98	54,63		
20A -13	39540	387887,4	7853,98	49,39	53,15	55,70
20A -17	44590	437427,9	7853,98	55,70		
20A -18	43520	426931,2	7853,98	54,36		
IDADE = 91 dias		Data rompimento: 03/12/2012				
10F -11	29050	284980,5	7853,98	36,28	36,51	37,70
10F -17	28470	279290,7	7853,98	35,56		
10F -18	30180	296065,8	7853,98	37,70		
15F -05	25550	250645,5	7853,98	31,91	31,85	31,96
15F -07	25360	248781,6	7853,98	31,68		
15F -18	25590	251037,9	7853,98	31,96		
20F -09	28020	274876,2	7853,98	35,00	34,76	35,02
20F -11	28040	275072,4	7853,98	35,02		
20F -13	27430	269088,3	7853,98	34,26		

Tabela B.6- Dados de absorção, índice de vazios e massa específica em concretos com 91 dias de cura úmida submersa.

Absorção por imersão			Dados (g)			Idade: 91 dias				03 corpos de prova de concreto Ø 10x20 cm					
Tipo de concreto	Data do ensaio	Nº da amostra	Massa sat. (m _{sat})	Massa subm. (m _i)	Massa seca (m _s)	Absorção (%) (A)	Índice de vazios (I _v)		Massa específica seca (kg/dm ³) (ρ _s)	Massa específica satur. (kg/dm ³) (ρ _{sat})		Massa específica real (kg/dm ³) (ρ _r)			
R	03/10/12	R-05	3748	2192	3506	6,90	6,92	15,55	15,55	2,25	2,26	2,41	2,42	2,67	2,68
		R-16	3826	2250	3584	*6,75		15,36		2,27		2,43		2,69	
		R-18	3787	2223	3541	6,95		15,73		2,26		2,42		2,69	
10A	10/10/12	10A-09	3798	2229	3568	6,45	6,79	14,66	15,36	2,27	2,27	2,42	2,42	2,66	2,67
		10A-15	3812	2239	3570	6,78		15,38		2,27		2,42		2,68	
		10A-17	3768	2204	3528	6,80		15,35		2,26		2,41		2,66	
15A	10/10/12	15A-10	3835	2253	3598	6,59	6,64	14,98	15,08	2,27	2,27	2,42	2,42	2,68	2,68
		15A-14	3812	2239	3566	6,90		15,17		2,27		2,42		2,69	
		15A-16	3830	2248	3590	6,69		15,17		2,27		2,42		2,68	
20A	12/10/12	20A-11	3785	2216	3547	6,71	7,07	15,17	15,91	2,26	2,25	2,41	2,41	2,66	2,67
		20A-14	3746	2184	3497	7,12		15,94		2,24		2,40		2,66	
		20A-15	3793	2224	3544	7,03		15,87		2,26		2,42		2,68	
10F	03/12/12	10F-09	3735	2161	3537	5,60	7,28	12,58	16,12	2,25	2,23	2,37	2,37	2,57	2,62
		10F-13	3774	2186	3524	7,09		15,74		2,22		2,38		2,63	
		10F-16	3742	2166	3482	7,47		16,50		2,21		2,37		2,65	
15F	03/12/12	15F-10	3663	2099	3382	8,31	8,14	17,97	17,64	2,16	2,17	2,34	2,34	2,64	2,62
		15F-16	3694	2117	3421	7,98		17,31		2,17		2,34		2,62	
		15F-17	3690	2114	3441	7,24		15,80		2,18		2,34		2,59	
20F	03/12/12	20F-12	3688	2124	3443	7,12	7,49	15,66	16,44	2,20	2,20	2,36	2,35	2,61	2,60
		20F-14	3656	2091	3444	6,16		13,55		2,20		2,34		2,55	
		20F-15	3713	2138	3442	7,87		17,21		2,19		2,36		2,64	

OBSERVAÇÃO: Norma utilizada - NBR 9778 (ABNT, 2005); *Os valores grifados em vermelho foram considerados espúrios e não entraram no cálculo das médias.

**APÊNDICE C–RESULTADOS INDIVIDUAIS DE
PROFUNDIDADE CARBONATADA, GANHOS DE MASSA,
DIFRATOGRAMAS DE CADA SITUAÇÃO,**

Tabela C.1- Medidas de profundidade carbonatada média dos concretos do primeiro grupo.

Medidas de profundidade carbonatada (mm)															Equip. utilizado: Programa computacional														
Quant. de semanas			1		3		6		9		12		16																
Data do ensaio			18/03/2013		04/04/2013		25/04/2013		16/05/2013		06/06/2013		04/07/2013																
Tipo Conc.	CP's	Região	ec (mm)	ecm (mm)	ec (mm)	ecm (mm)	ec (mm)	ecm (mm)	ec (mm)	ecm (mm)	ec (mm)	ecm (mm)	ec (mm)	ecm (mm)															
R	1	1	4,09	4,14	5,73	5,83	6,71	6,65	7,50	8,95	7,79	8,44	12,56	13,93															
		2	3,82		5,81		6,40		9,98		8,18		14,79																
		3	4,03		6,13		6,89		8,87		8,14		13,30																
		4	4,61		5,64		6,62		9,46		9,66		15,05																
	2	1	4,23	4,03	5,87	6,68	6,97	7,38	9,27	8,44	7,18	8,22	15,63	15,29															
		2	4,21		7,15		7,70		7,84		10,05		16,62																
		3	4,19		5,95		6,57		9,30		6,10		14,06																
		4	3,49		7,74		8,28		7,35		9,55		14,86																
10A	1	1	4,40	4,75	6,19	6,50	8,25	7,11	8,01	8,90	7,86	8,97	12,62	13,97															
		2	5,70		6,33		7,64		10,00		8,74		13,98																
		3	4,43		6,64		6,44		7,98		11,12		15,45																
		4	4,45		6,82		6,11		9,61		8,17		13,81																
	2	1	4,67	4,67	5,52	6,21	6,42	7,23	8,11	9,86	7,56	9,83	12,73	12,47															
		2	4,73		6,26		7,32		10,56		9,73		11,98																
		3	5,28		6,67		9,19		10,64		11,80		11,42																
		4	4,00		6,39		5,98		10,14		10,25		13,75																
15A	1	1	4,28	3,92	4,62	4,55	9,46	8,52	9,58	12,20	8,32	10,19	13,80	14,14															
		2	4,16		5,50		7,01		10,56		11,09		13,37																
		3	3,74		3,33		9,09		16,69		11,14		15,40																
		4	3,49		4,75		8,53		11,98		10,23		13,98																
	2	1	3,54	3,45	7,65	7,01	7,24	7,35	10,38	10,54	10,44	11,92	12,58	13,72															
		2	3,75		6,77		6,68		12,80		11,70		13,41																
		3	3,14		6,44		7,47		9,00		12,58		15,01																
		4	3,36		7,17		8,03		10,00		12,95		13,87																
20A	1	1	3,43	3,53	6,94	7,30	7,05	8,71	10,74	12,40	14,11	13,78	16,79	18,57															
		2	3,67		7,53		9,13		12,56		13,55		19,98																
		3	3,26		7,04		9,74		12,60		12,00		18,40																
		4	3,75		7,69		8,90		13,70		15,48		19,11																
	2	1	3,14	3,46	7,83	7,71	8,18	9,86	12,92	12,45	12,75	13,55	16,32	16,72															
		2	3,58		9,78		11,24		11,88		13,88		15,98																
		3	3,47		6,42		9,86		12,49		13,03		18,27																
		4	3,64		6,82		10,16		12,50		14,55		16,31																

CP's = corposdeprova; ec = espessura carbonatada; ecm = espessura carbonatada média.

Tabela C.2- Medidas de profundidade carbonatada média dos concretos do segundo grupo.

Medidas de profundidade carbonatada (mm)															Equip. utilizado: Programa computacional														
Quant. de semanas			1		3		6		9		12		16																
Data do ensaio			18/03/2013		04/04/2013		25/04/2013		16/05/2013		06/06/2013		04/07/2013																
Tipo Conc.	CP's	Região	ec (mm)	ecm (mm)	ec (mm)	ecm (mm)	ec (mm)	ecm (mm)	ec (mm)	ecm (mm)	ec (mm)	ecm (mm)	ec (mm)	ecm (mm)															
R	1	1	4,09	4,14	5,73	5,83	6,71	6,65	7,50	8,95	7,79	8,44	12,56	13,93															
		2	3,82		5,81		6,40		9,98		8,18		14,79																
		3	4,03		6,13		6,89		8,87		8,14		13,30																
		4	4,61		5,64		6,62		9,46		9,66		15,05																
	2	1	4,23	4,03	5,87	6,68	6,97	7,38	9,27	8,44	7,18	8,22	15,63	15,29															
		2	4,21		7,15		7,70		7,84		10,05		16,62																
		3	4,19		5,95		6,57		9,30		6,10		14,06																
		4	3,49		7,74		8,28		7,35		9,55		14,86																
10F	1	1	5,53	5,64	10,37	10,82	14,92	15,42	18,71	18,63	17,31	17,82	25,12	24,63															
		2	6,20		11,13		15,19		20,05		19,62		25,16																
		3	5,74		11,13		15,30		16,25		16,93		25,04																
		4	5,11		10,65		16,26		19,49		17,41		23,20																
	2	1	5,74	5,64	9,03	10,55	13,17	14,19	18,31	19,53	17,55	18,07	24,95	24,17															
		2	5,35		10,51		13,98		21,25		17,09		25,01																
		3	5,30		11,17		14,92		18,10		16,29		23,42																
		4	6,15		11,49		14,67		20,46		21,36		23,32																
15F	1	1	7,61	7,67	14,60	14,19	15,47	17,88	22,85	24,00	27,78	26,57	31,71	32,51															
		2	7,86		14,32		20,56		23,70		22,85		33,25																
		3	6,41		14,14		17,77		24,94		27,88		32,83																
		4	8,79		13,71		17,70		24,52		27,79		32,27																
	2	1	8,72	7,88	14,63	14,90	18,73	18,50	22,19	22,51	25,61	27,13	33,55	35,10															
		2	8,06		15,83		20,78		24,19		29,19		37,90																
		3	7,70		13,30		17,38		20,97		27,20		33,32																
		4	7,06		15,84		17,10		22,68		26,53		35,66																
20F	1	1	6,43	6,58	13,85	13,60	14,99	16,18	18,79	20,92	23,81	23,26	30,70	30,50															
		2	6,41		15,51		15,86		21,26		23,73		30,30																
		3	6,28		13,03		17,20		22,79		24,01		30,11																
		4	7,19		11,99		16,68		20,82		21,51		30,89																
	2	1	5,91	7,13	13,56	13,72	15,94	15,83	24,15	22,56	24,01	24,44	28,39	28,28															
		2	7,04		12,75		16,85		22,51		22,82		29,28																
		3	7,72		13,65		15,70		22,53		25,46		27,69																
		4	7,85		14,92		14,83		21,03		25,46		27,75																

CP's = corposdeprova; ec = espessura carbonatada; ecm = espessura carbonatada média.

Tabela C.3- Dados das médias de profundidades carbonatadas e ganhos de massa.

Profundidade carbonatada e Evolução de massa														
Carbon. (semanas)		1		3		6		9		12		16		
Tipo de conc.	Data do ensaio	18/03/13		04/04/13		25/04/13		16/05/13		06/06/13		04/07/13		
R	Nº do CP	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
	Δ Massa média (g)	10,4		16,1		17,8		18,5		22,0		26,7		
	ecm(mm)	Paquim.	4,4		5,6		7,3		8,7		8,3		14,6	
		Autocad	4,1		6,3		7,0		8,7		8,3		14,6	
10A	Nº do CP	02	03	04	05	06	07	08	10	11	12	13	14	
	Δ Massa média (g)	9,6		13,9		16,2		19,4		18,8		23,8		
	ecm (mm)	Paquim.	3,7		6,2		9,0		9,0		9,3		14,2	
		Autocad	4,7		6,4		7,2		9,4		9,4		13,2	
15A	Nº do CP	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
	Δ Massa média (g)	8,0		13,3		15,1		18,5		20,4		21,2		
	ecm (mm)	Paquim.	3,3		5,5		8,8		11,1		11,0		14,5	
		Autocad	3,7		5,8		7,9		11,4		11,1		13,9	
20A	Nº do CP	01	02	03	05	06	07	08	09	10	11	12	14	
	Δ Massa média (g)	10,9		15,3		21,3		22,5		26,0		28,8		
	ecm (mm)	Paquim.	4,2		7,7		10,0		12,5		13,1		18,2	
		Autocad	3,5		7,5		9,3		12,4		13,7		17,6	
10F	Nº do CP	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
	Δ Massa média (g)	11,3		16,4		21,0		24,0		24,7		26,6		
	ecm (mm)	Paquim.	6,1		10,8		15,5		19,3		17,2		24,7	
		Autocad	5,6		10,7		14,8		19,1		17,9		24,4	
15F	Nº do CP	01	02	03	05	06	07	08	09	10	11	12	13	
	Δ Massa média (g)	13,0		18,6		22,3		23,6		26,0		26,3		
	ecm (mm)	Paquim.	8,5		15,0		18,4		23,7		26,5		32,9	
		Autocad	7,8		14,5		18,2		23,3		26,9		33,8	
20F	Nº do CP	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
	Δ Massa média (g)	12,1		18,0		20,4		22,0		25,5		25,2		
	ecm (mm)	Paquim.	8,0		14,3		16,4		21,6		24,0		30,8	
		Autocad	6,9		13,7		16,0		21,7		23,8		29,4	

CP = corpos de prova; ecm = espessura carbonatada média; Δ = variação de massa.

Figura C.1- Determinação dos coeficientes de carbonatação a partir das curvas de tendência.

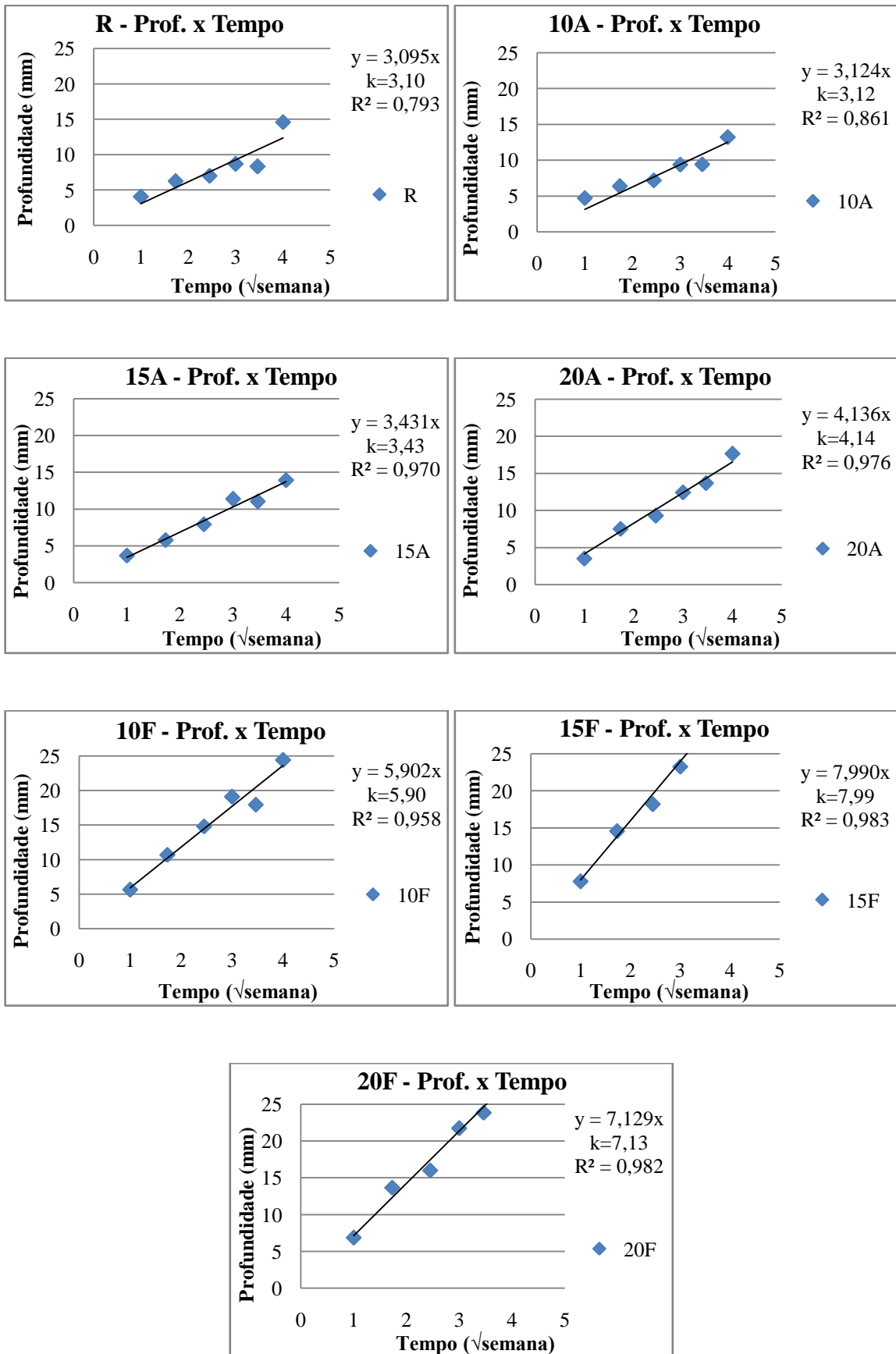


Figura C.2- Difratoograma da argamassa R não carbonatada.

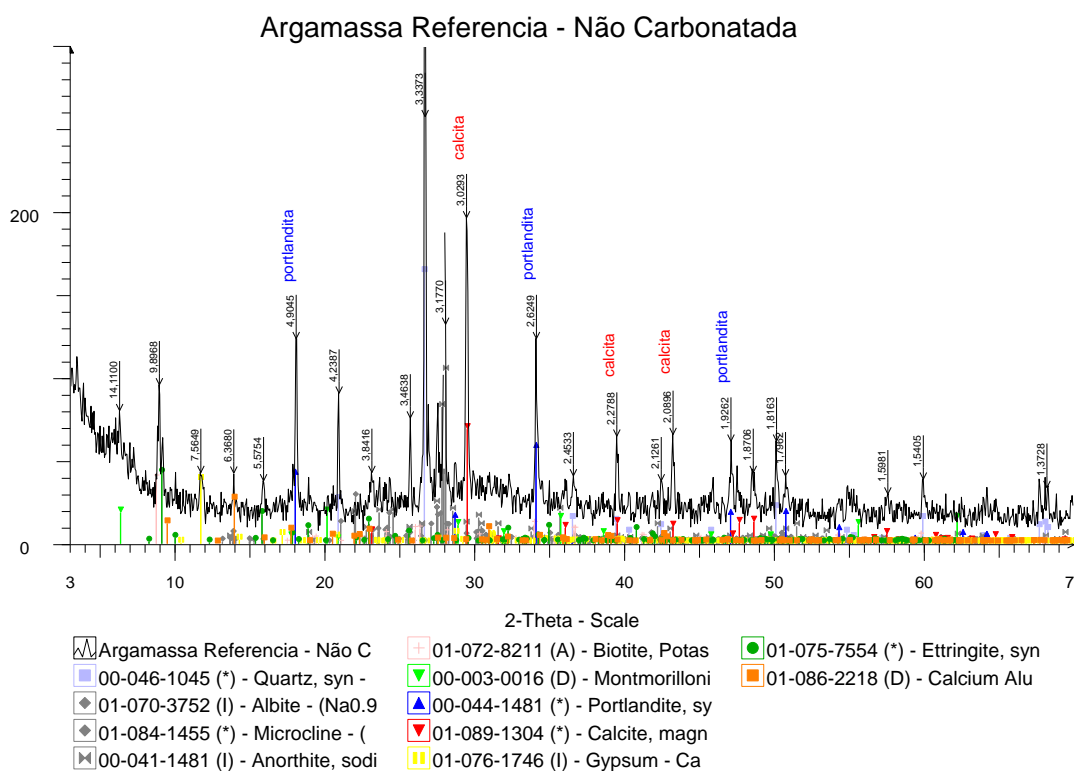


Figura C.3- Difratoograma da argamassa R carbonatada.

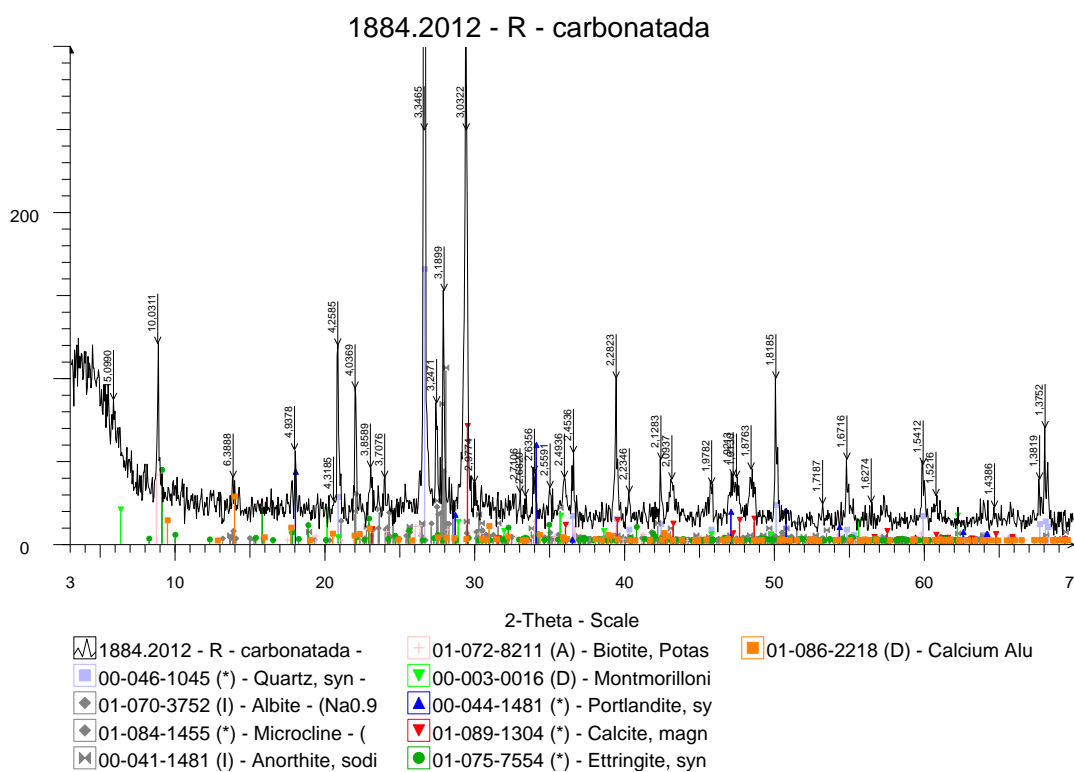


Figura C.4- Difratoograma da argamassa 10A não carbonatada do primeiro grupo.

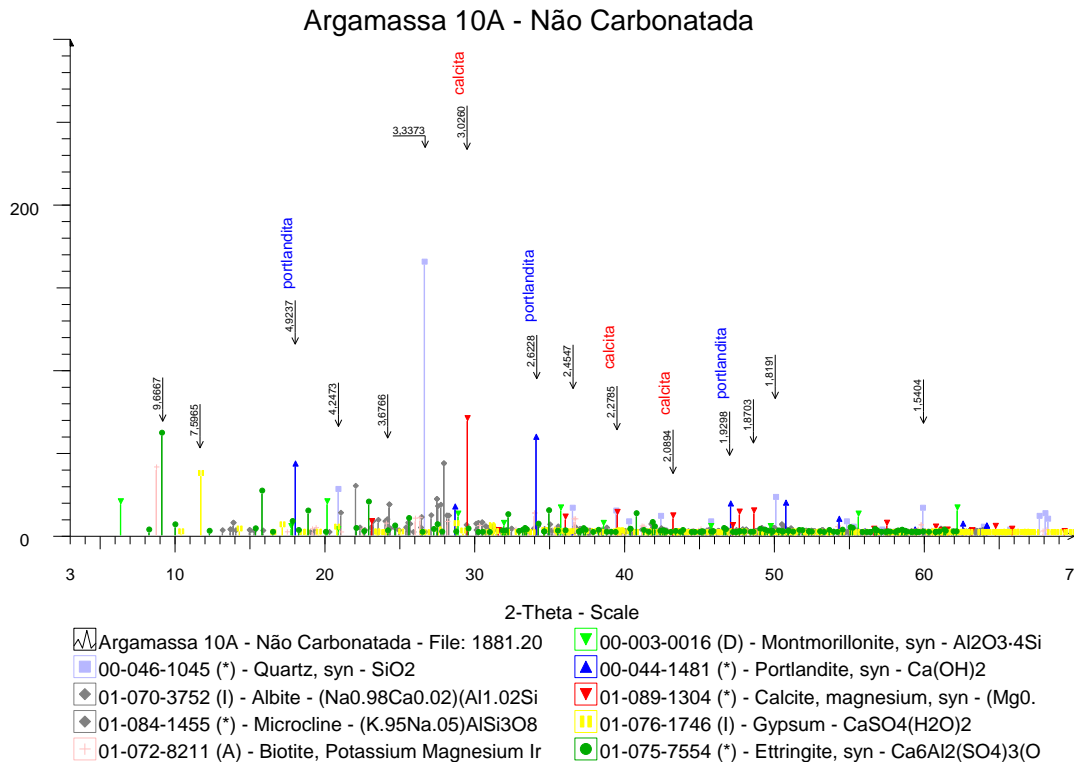


Figura C.5- Difratoograma da argamassa 10A carbonatada do primeiro grupo.

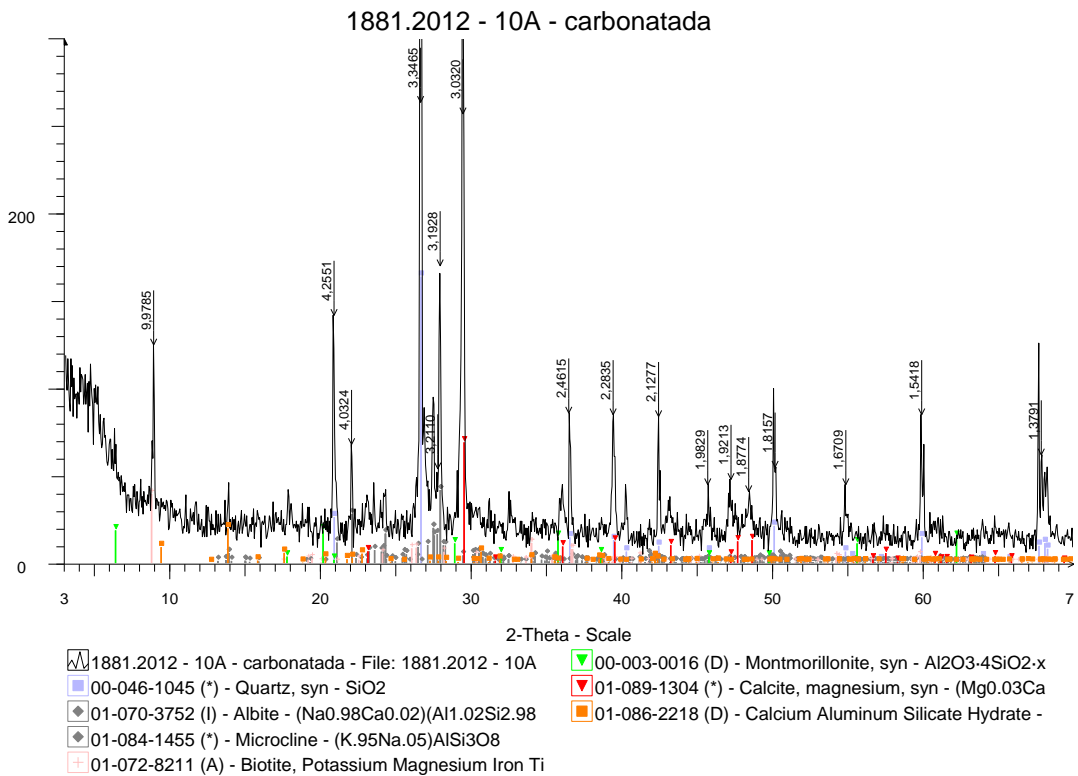


Figura C.6- Difratoograma da argamassa 15A não carbonatada do primeiro grupo.

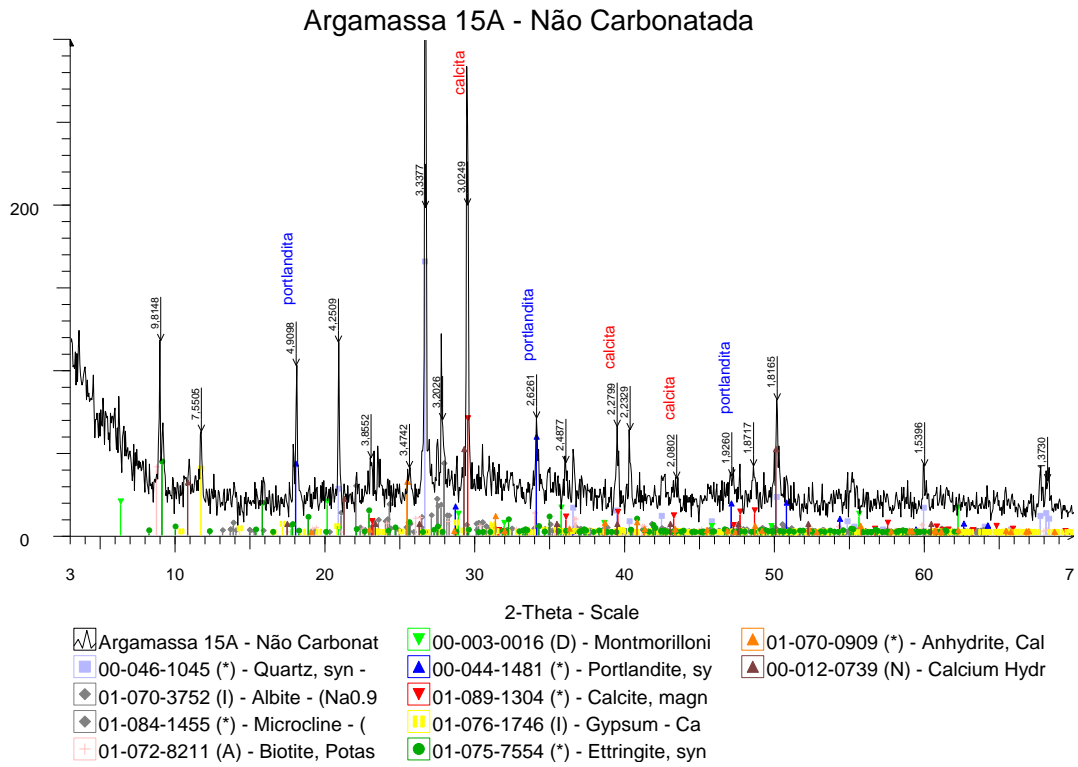


Figura C.7- Difratoograma da argamassa 15A carbonatada do primeiro grupo.

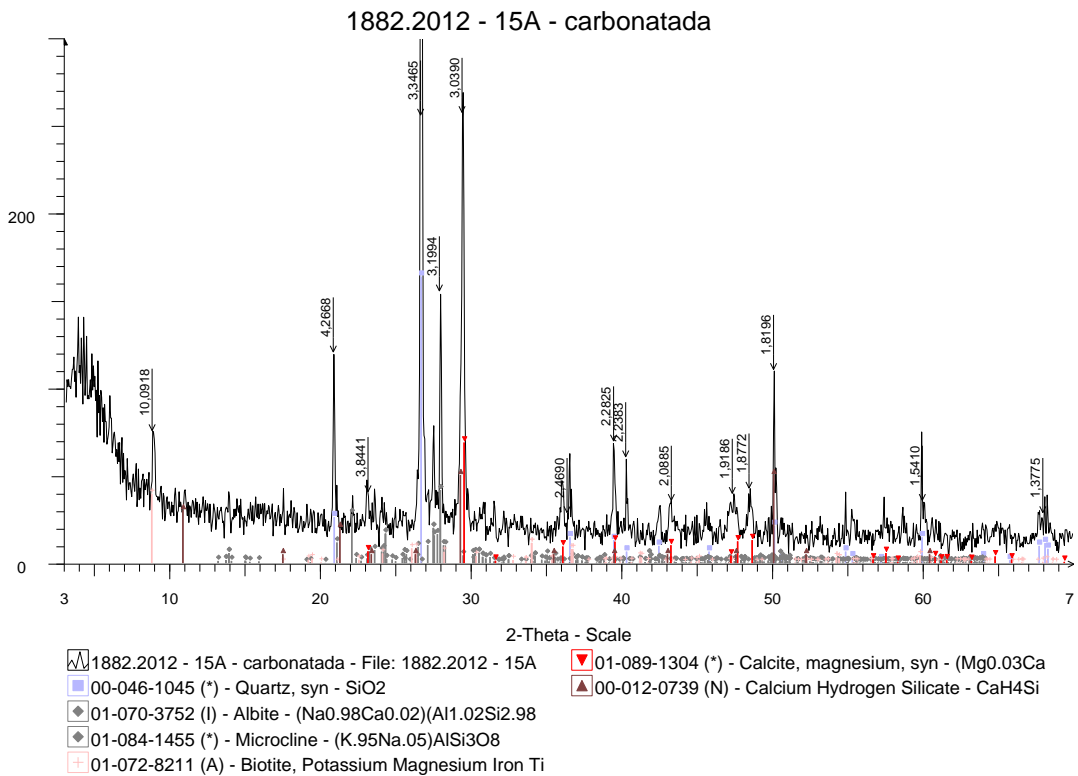


Figura C.8- Difratoograma da argamassa 20A não carbonatada do primeiro grupo.

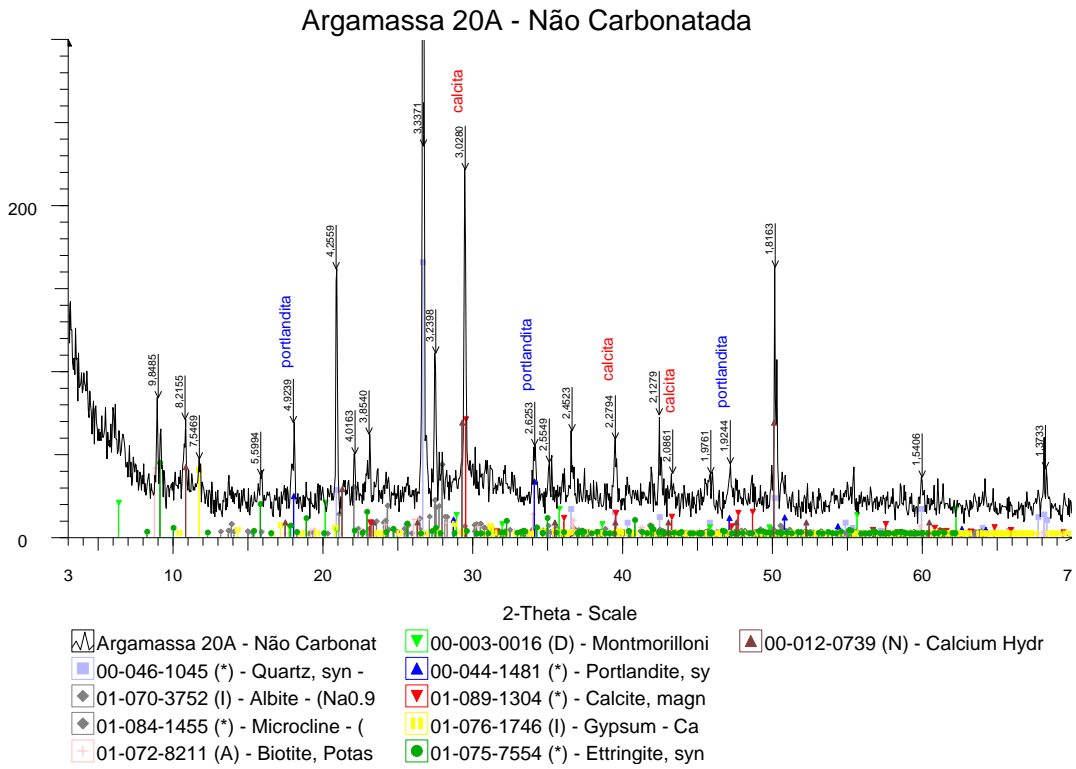


Figura C.9- Difratoograma da argamassa 20A carbonatada do primeiro grupo.

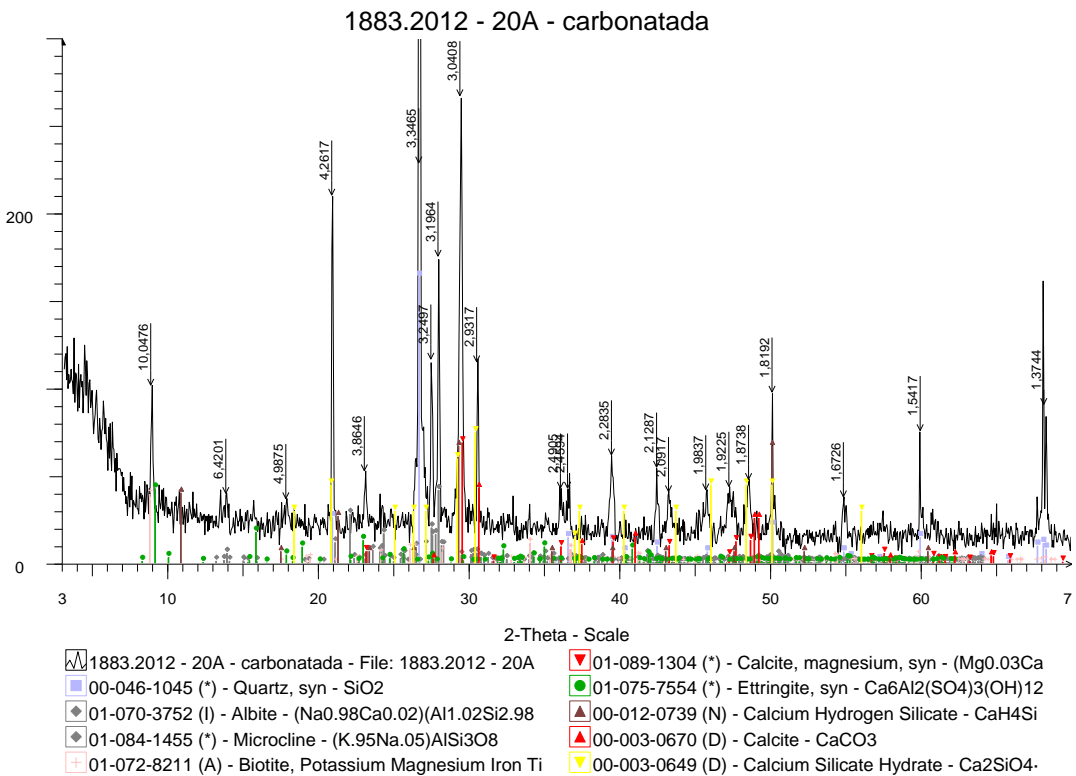


Figura C.10- Difratoograma da argamassa 10F não carbonatada do segundo grupo.

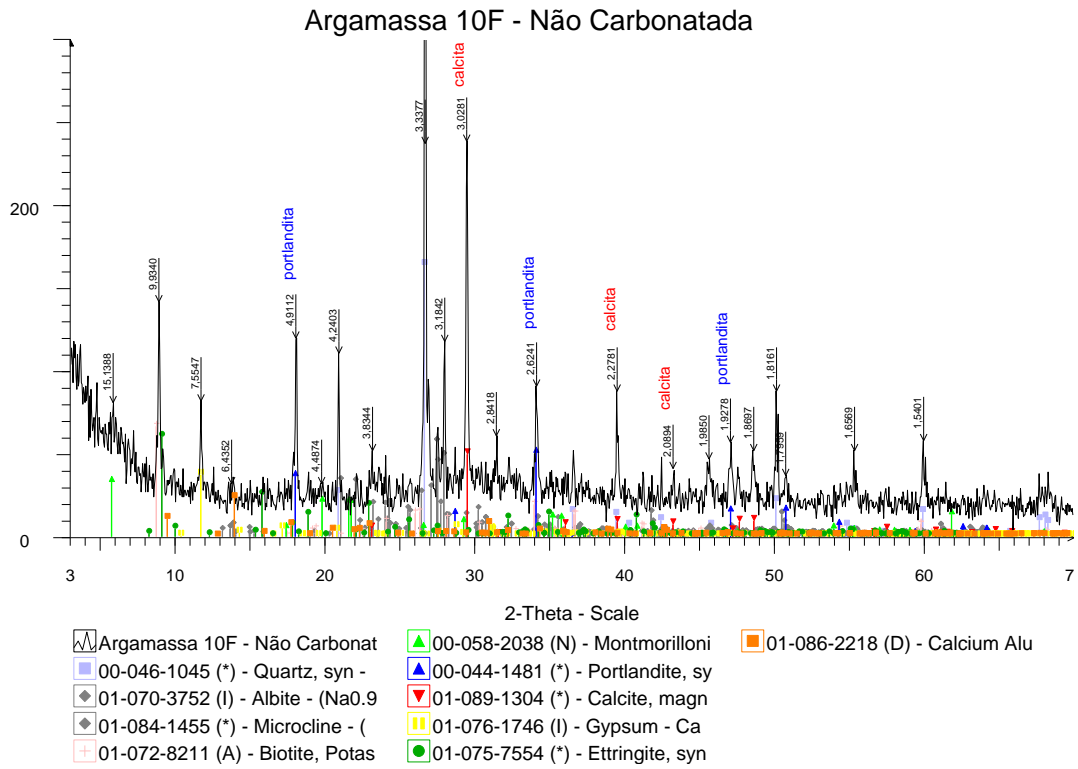


Figura C.11- Difratoograma da argamassa 10F carbonatada do segundo grupo.

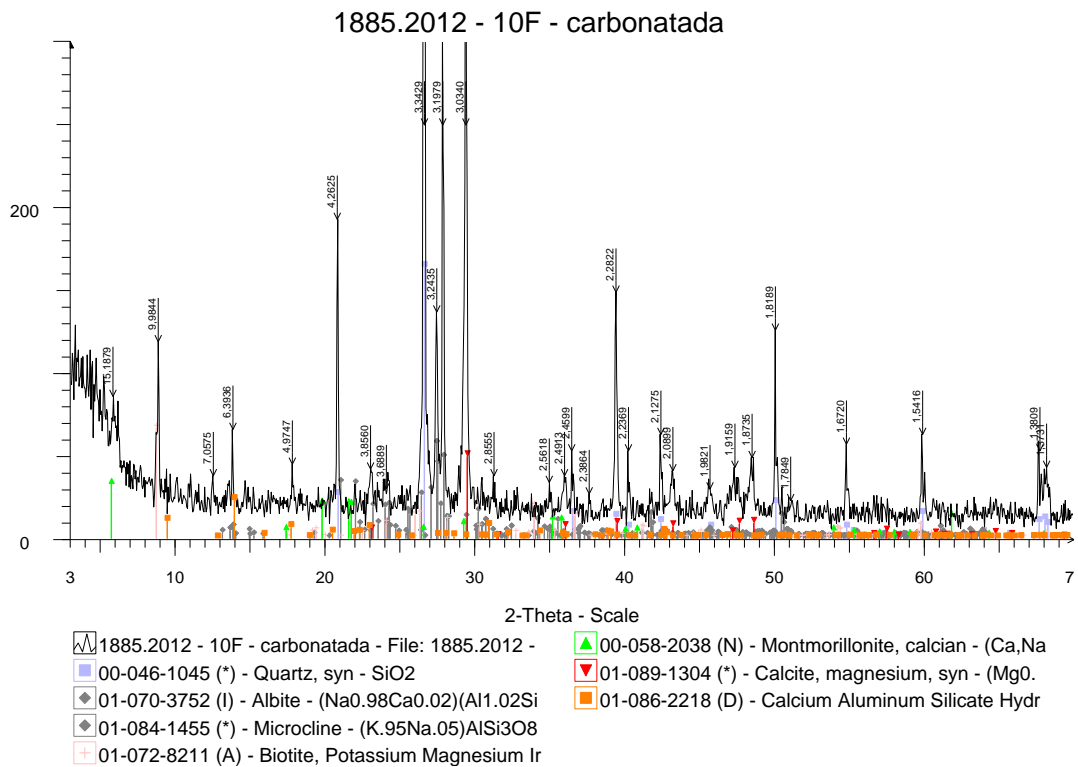


Figura C.12- Difratoograma da argamassa 15F não carbonatada do segundo grupo.

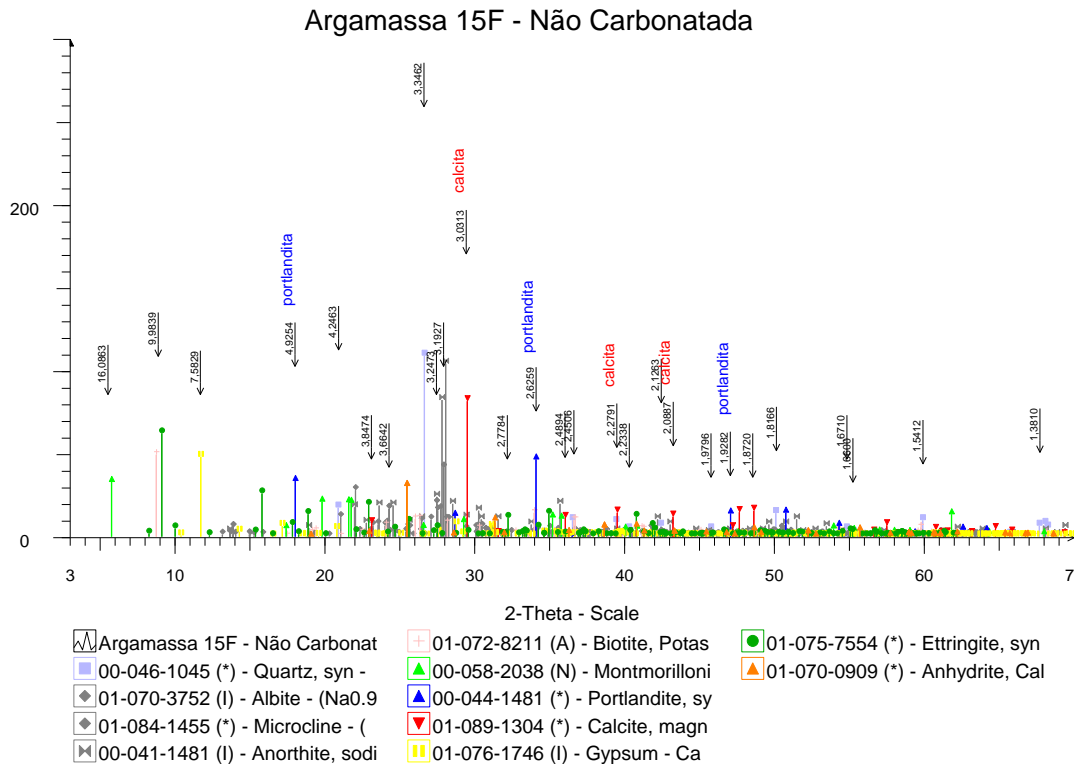


Figura C.13- Difratoograma da argamassa 15F carbonatada do segundo grupo.

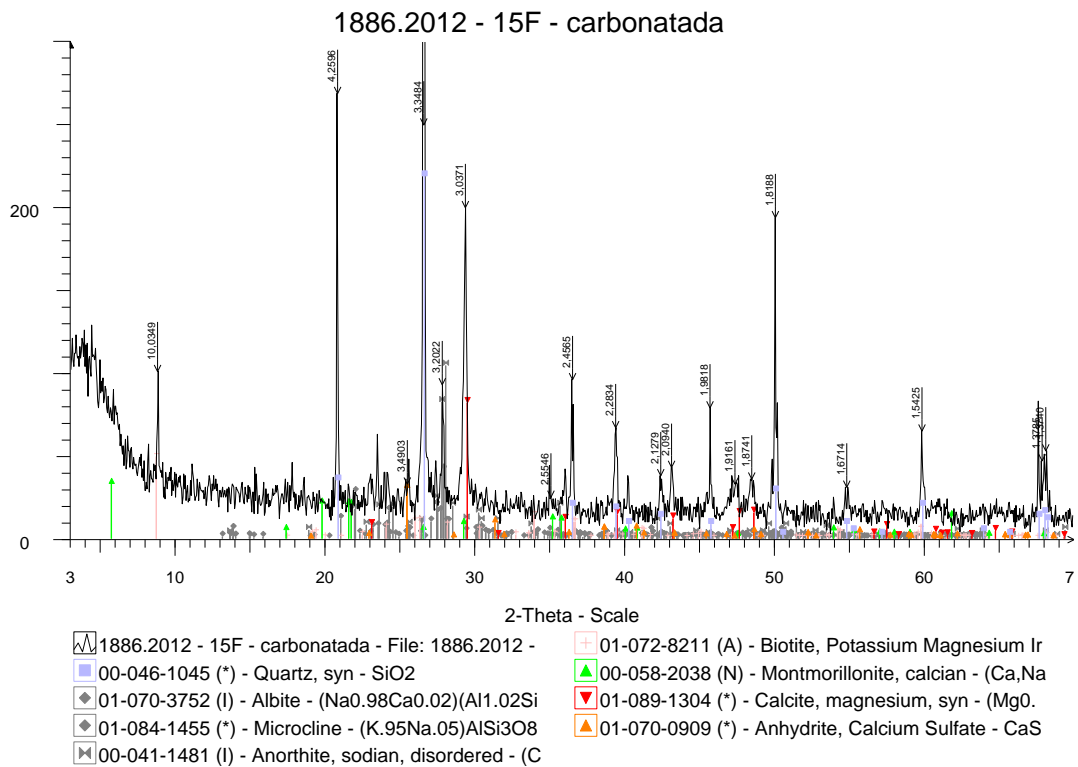


Figura C.14- Difratoograma da argamassa 20F não carbonatada do segundo grupo.

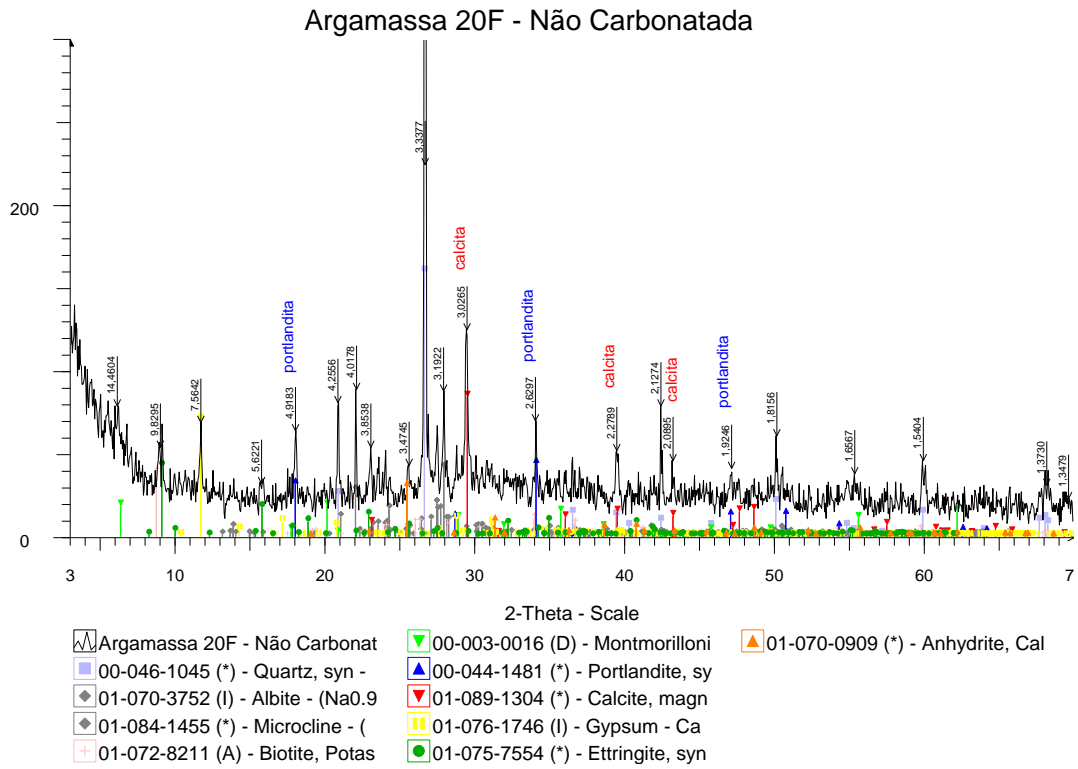


Figura C.15- Difratoograma da argamassa 20F carbonatada do segundo grupo.

