UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CARBONATAÇÃO ACELERADA DE CONCRETOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ SEM MOAGEM

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Roger Mazza

Santa Maria, RS, Brasil
2015

CARBONATAÇÃO ACELERADA DE CONCRETOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ SEM MOAGEM

Roger Mazza

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia

Santa Maria, RS, Brasil
2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática
da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Mazza, Roger
Carbonatação acelerada de concretos com cinza de casca de arroz sem moagem / Roger Mazza.-2015.
106 p.; 30cm

Orientador: Geraldo Cechella Isaia
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2015

1. carbonatação acelerada 2. cinza de casca de arroz natural 3. durabilidade 4. concreto estrutural I. Cechella Isaia, Geraldo II. Título.

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

CARBONATAÇÃO ACELERADA DE CONCRETOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ SEM MOAGEM

elaborada por
Roger Mazza

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

_____
Prof. Eng. Geraldo Cechella Isaia, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

_____
Prof. Arq. Antônio Luiz Guerra Gastaldini, Dr. (UFSM)

_____
Prof. Eng. Cláudio de Souza Kazmierczak, Dr. (UNISINOS)

Santa Maria, 14 de janeiro de 2015.

Este trabalho é dedicado a minha família...
...Luciane, minha esposa, companheira, amiga e incentivadora em tudo o que faço... e as nossas filhas, Ariéli, Ariádini e Gabriela, que completam a nossa felicidade...e são os motivos de sempre seguirmos em frente...

AGRADECIMENTOS

A Deus sempre presente em minha vida.

Ao Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia, pela paciência, incentivo e generosidade na orientação desta dissertação.

A Marisa, minha mãe e ao querido Mário, pelo incentivo nos estudos e no crescimento profissional.

Aos meus irmãos Karin, Rafael e meu sobrinho Pablo pela parceria e descontração que em muitos momentos foram fundamentais e necessários.

Ao amigo, Eng. Ms. Ildomar S. Tavares, por insistir que eu fizesse o mestrado e por fazer-me persistir e acreditar que era possível fanalizá-lo.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, principalmente aos meus novos amigos Arq. André de Souza Pereira e Arq. Fábio Maciel de Oliveira da Trindade, onde juntos enfrentamos e superamos muitas adversidades, principalmente nas moldagens dos CP's no LMCC, mas que se tornaram bons momentos para serem lembrados.

Aos amigos ex-bolsistas do LMCC: Lucas Lamberti, Maurício Silveira dos Santos, Pedro Orlando Borges de Almeida Júnior e Usama Nessim Sâmara, pela dedicação e ajuda nas moldagens.

Aos professores do PPGEC por mais este conhecimento adquirido.

À professora Tatiana Cureau Cervo, pela boa vontade de ajudar sempre que foi preciso.

Ao amigo Eng. Maisson Tasca que, quando solicitado, estava sempre disposto a ajudar, tanto nas dúvidas que surgiam na parte laboratorial (ensaios) como na interpretação de resultados (gráficos e tabelas).

A todos que de alguma forma colaboraram para a realização desta dissertação.

Muito obrigado!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria

CARBONATAÇÃO ACELERADA DE CONCRETOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ SEM MOAGEM

AUTOR: ROGER MAZZA
ORIENTADOR: GERALDO CECHELLA ISAIA
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 14 de janeiro de 2015.

A carbonatação é um fenômeno físico-químico que ocorre naturalmente nas estruturas de concreto. Quanto maior a presença de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera e, em contato com a umidade e os produtos de hidratação do cimento, maior será a profundidade de carbonatação. Seu principal efeito pela redução da alcalinidade (pH) é a despassivação da armadura, que deixa o aço desprotegido e susceptível a corrosão. Em vista disso, a presente pesquisa teve por objetivo verificar a viabilidade técnica do emprego da cinza de casca de arroz sem moagem (natural - CCAN), em substituição parcial de cimento, para concretos com fins estruturais frente a carbonatação acelerada, assim como, colaborar com o desenvolvimento sustentável na construção civil, já que as CCAN são resíduos de processos industriais do beneficiamento do grão onde, muitas vezes, são descartadas diretamente no meio ambiente sem nenhuma preocupação ambiental. Baseados nestes preceitos, foram investigadas misturas de CPII-Z e CP-IV com teores de 15% de substituição de cimento em massa por CCAN e CCAM para as relações a/ag de 0,45; 0,55 e 0,65 e comparadas com as misturas de REF. Foram verificadas as profundidades, os coeficientes de carbonatação e os teores de hidróxido de cálcio remanescentes aos 91 dias. Os ensaios de carbonatação acelerada foram realizados em 4, 8, 12 e 16 semanas de exposição ao CO_2 em câmara climática e conforme determina a RILEM TC 116-PCD (1999). Os resultados mostraram que as profundidades de carbonatação foram crescentes ao longo do tempo e das relações a/ag estipulados nesta pesquisa para todas as misturas, obtendo-se as menores profundidades para menores a/ag das misturas de REF de CPII-Z. Para as misturas de CCAN, predominaram profundidades menores para os dois cimentos utilizados (CPII-Z e CP-IV) quando comparadas com as CCAM, obtendo-se para as de CPII-Z profundidades inferiores as de CP-IV. Quando comparados em igualdade de relação a/ag e de resistência, observou-se que os coeficientes de carbonatação dependeram do tipo de cimento e de CCA de cada mistura, sendo os menores obtidos para as misturas de REF de CPII-Z, assim como os maiores teores de hidróxido de cálcio (CH), quando comparados aos de CP-IV. Para as misturas contendo adições de CCA, predominou melhores resultados para as misturas de CCAN quando comparadas com as CCAM, verificando-se para as misturas de CCAN de CPII-Z e CP-IV para a resistência C30 que existe a possibilidade de utilização em concretos para fins estruturais quando a variável a ser considerada é a carbonatação.

Palavras chave: carbonatação acelerada, cinza de casca de arroz natural, durabilidade, concreto estrutural.

ABSTRACT

Master Dissertation
Post-Graduation Program in Civil Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

ACCELERATED CARBONATION OF CONCRETE WITH RICE HUSK ASH WITHOUT GRINDING

AUTHOR: ROGER MAZZA
COORDINATOR: GERALDO CECHELLA ISAIA
City and Date: Santa Maria, January 14th 2015.

The carbonation is a physicochemical phenomenon that occurs naturally in concrete structures. The greater the presence of carbon dioxide (CO_2) in the atmosphere and in contact with moisture and hydration products of cement, the greater the depth of carbonation. Its main effect by reducing the alkalinity (pH) is the armature depassivation, which leaves the steel unprotected and susceptible to corrosion. In view of this, the present study aimed to verify the technical viability of using unground rice husk ash (natural – NRHA) in partial replacement of cement for concrete for structural purposes against accelerated carbonation, as well as to collaborate with sustainable development in construction, since NRHA are residues from industrial processes of grain processing, which often are discarded directly into the environment without any environmental concern. Based on these principles, the mixtures were investigated CPII-Z and CP-IV with contents of 15% of cement mass replacement by NRHA and GRHA for w/b ratios of 0.45, 0.55 and 0.65 and compared with the REF mixtures. The depths were verified, the carbonation coefficients and the calcium hydroxide contents remaining after 91 days. Accelerated carbonation tests were performed at 4, 8, 12 and 16 weeks of exposure to CO_2 in an environmental chamber as the recommendation of RILEM TC 116-PCD (1999). The results showed that the carbonation depths were increased over time and the w/b ratios stipulated in this study for all mixtures, yielding the lowest depths to the lowest w/b of REF and CPII-Z mixtures. For NRHA mixtures, predominated shallower depths for both cements (CPII-Z and CP-IV) when compared with GRHA, yielding lower depths for CPII-Z than for CP-IV. When compared on an equal w/b ratio and resistance, was observed that carbonation coefficients depended on the type of cement and on the RHA of each mixture. The lowest coefficients were obtained for REF and CPII-Z mixtures, as well the highest contents of calcium hydroxide (CH) when compared to the contents of CP-IV. For mixtures containing RHA additions, predominated better results for NRHA mixtures compared with GRHA, verifying for mixtures of NRHA of CPII-Z and CP-IV for resistance C30 it is possible to use in concrete for structural purposes when the variable to be considered is the carbonation.

Keywords: accelerated carbonation, rice husk ash unground, durability, structural concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Panteão de Roma, 120 dC **17**
Figura 1.2 - Burj Khalifa em Dubai, 2010 ..... **17**
Figura 1.3 - Concentração de gás carbônico na atmosfera **18**
Figura 2.1 - Esquematização do fenômeno da carbonatação **25**
Figura 2.2 - Representação do avanço da frente de carbonatação **25**
Figura 2.3 - Profundidade de carbonatação X relação a/ag **29**
Figura 2.4 - Representação esquemática da difusão do CO_2 ..... **35**
Figura 2.5 - Correlação entre o coeficiente de carbonatação natural e o teor de hidróxido de cálcio remanescente para nível de resistência de 70Mpa **37**
Figura 2.6 - Coeficiente de carbonatação X relação a/ag **47**
Figura 3.1 - Microfotografias por microscopia óptica da cinza de casca de arroz moída (CCAM), da cinza de casca de arroz natural como recebida (CCAN) e cinza de casca de arroz natural após a moagem na betoneira **56**
Figura 3.2 - DR-X da CCA natural **57**
Figura 3.3 - DR-X da CCA moída **57**
Figura 3.4 - Curva granulométrica dos agregados miúdos **60**
Figura 3.5 - Curva granulométrica dos agregados graúdos **60**
Figura 3.6 - Controle de temperatura do concreto **64**
Figura 3.7 - Abatimento de tronco de cone do concreto **64**
Figura 3.8 - Adensamento dos corpos de prova em mesa vibratória **65**
Figura 3.9 - Desmoldagem das misturas após 24 horas **65**
Figura 3.10 - Corpos de prova em cura na câmara úmida a 95% de U.R **66**
Figura 3.11 - Prensa hidráulica para ensaio de compressão axial **67**
Figura 3.12 - Corpo de prova e moagem para determinação dos parâmetros da pré-secagem de cada mistura **69**
Figura 3.13 - Corpo-de-prova na estufa para pré-secagem **70**
Figura 3.14 - Corpo de prova envolto em filme de PVC **70**
Figura 3.15 - Corpo de prova embalado em saco de polipropileno **71**
Figura 3.16 - Corpo de prova embalado em saco de polietileno e alumínio **71**
Figura 3.17 - Corpo de prova na estufa a 50°C **72**
Figura 3.18 - Sala e câmara de carbonatação **72**
Figura 3.19 - Rompimento diametral dos corpos de prova **73**
Figura 3.20 - Rompimento diametral dos corpos de prova **73**
Figura 3.21 - (A) e (B) Corpos de prova com parte carbonatada (incolor) e não carbonatada (violeta) **74**
Figura 3.22 - Gráfico para o cálculo do coeficiente de carbonatação (Kc) **76**
Figura 3.23 - Pó obtido na peneira de malha # 200 ..... **76**

Figura 3.24 - (A) Secagem das mostras em estufa 60°C e (B) Amostra em pó, em recipiente para ensaios ABCP **77**
Figura 4.1 - Profundidade de carbonatação 16 semanas - CPII-Z x rel a/ag – (mm) **80**
Figura 4.2 - Profundidade de carbonatação 16 semanas - CP-IV x rel a/ag – (mm) **80**
Figura 4.3 - Coeficiente Kc X rel a/ag – CPII-Z (REF) **83**
Figura 4.4 - Coeficiente Kc X rel a/ag – CPII-Z (CCAN) **84**
Figura 4.5 - Coeficiente Kc X rel a/ag – CPII-Z (CCAM) **84**
Figura 4.6 - Coeficiente Kc X rel a/ag – CP-IV (REF) **85**
Figura 4.7 - Coeficiente Kc X rel a/ag – CPII-Z (CCAN) **86**
Figura 4.8 - Coeficiente Kc X rel a/ag – CP-IV (CCAM) **86**
Figura 4.9 - Coeficiente de carbonatação (Kc) – CPII-Z x CP-IV **87**
Figura 4.10 - (A) coeficiente de carbonatação (Kc) x relação a/ag e (B) coeficientes de carbonatação x teor de CCA **88**
Figura 4.11 - Teor de CH remanescente (%) das zonas não carbonatadas (NC) X a/ag das misturas CP-IV e CPII-Z **90**
Figura 4.12 - Teor de CH remanescente (%) das zonas carbonatadas (C) X a/ag das misturas CP-IV e CPII-Z **90**
Figura 4.13 - Coef. de carbonatação (Kc) em igualdade de resistência das misturas CPII-Z x CP-IV **93**

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Caracterização física dos cimentos e CCA **55**

Quadro 2 - Análise química dos cimentos e CCA **56**

Quadro 3 - Convenções do ensaio de pozolanicidade **58**

Quadro 4 - Índice de atividade pozolânica **58**

Quadro 5 - Características dos agregados utilizados **59**

Quadro 6 - Materiais por m³ de concreto para o cimento CPII-Z (Kg/m³) **62**

Quadro 7 - Materiais por m³ de concreto para o cimento CPIV (kg/m³) **62**

Quadro 8 - Ordem de colocação e tempo de mistura dos materiais na betoneira .. **63**

Quadro 9 - Profundidade de carbonatação com CPII-Z – (mm) **79**

Quadro 10 - Profundidade de carbonatação com CP-IV – (mm) **79**

Quadro 11 - Coeficiente de carbonatação acelerada (kc) – CPII-Z / 16 semanas **82**

Quadro 12 - Coeficiente de carbonatação acelerada (kc) – CP-IV / 16 semanas **82**

Quadro 13 - Coeficientes de carbonatação (Kc) em mm/sem.$^{-0,5}$ e teores de hidróxido de cálcio, em %, para as zonas não carbonatadas (NC) e carbonatadas (C), para as relações a/ag estudadas **89**

Quadro 14 - Coeficientes de carbonatação (Kc) em mm/sem.$^{-0,5}$ e teores de hidróxido de cálcio em % para as zonas não carbonatadas (NC) e carbonatadas (C) em igualdade de resistência à compressão axial **92**

EQUAÇÕES

Equação 2.1 ..... **26**

Equação 2.2 ..... **26**

Equação 2.3 ..... **26**

Equação 2.4 ..... **26**

Equação 2.5 ..... **27**

Equação 2.6 ..... **27**

Equação 2.7 ..... **27**

Equação 3.8 ..... **27**

Equação 3.9 ..... **27**

Equação 3.10 ..... **27**

Equação 3.11 ..... **27**

Equação 3.12 ..... **41**

Equação 3.13 ..... **63**

Equação 3.14 ..... **68**

Equação 3.15 ..... **68**

Equação 3.16 ..... **69**

Equação 3.17 ..... **69**

Equação 3.18 ..... **75**

Equação 3.19 ..... **75**

LISTA DE ABREVIATURAS

a/ag - Relação água aglomerante em massa
Al2O3 - Óxido de alumínio
ASTM - American Standart for Testing Materials
C3S - Silicato tricálcio
C2S - Silicato dicálcico
CaCO3 - Carbonato de cálcio
CaO - Óxido de cálcio
Ca(OH)2 - Hidróxido de cálcio
CaSO4 - Sulfato de cálcio
CCA - Cinza de casca de arroz
CCAN - Cinza de casca de arroz natural
CCAM - Cinza de casca de arroz moída
CH - Hidróxido de cálcio
CL^- - Íons cloreto
CO2 - Anidrido carbônico ou dióxido de carbono
CPII-Z - Cimento Portland Composto de Pozolana
CP-IV – Cimento Portland Pozolânico
C-S-H - Silicato de cálcio hidratado
CV - Cinza Volante
Fe2O3 - Óxido de ferro
g/cm3 - Grama por centímetro cúbico, medida de massa específica
K^+ - Íons potássio
Kc - Coeficiente de carbonatação
Kg - Quilograma
Kg/dm3 - Quilograma por decímetro cúbico, medida de massa específica
Kg/m3 - Quilograma por metro cúbico, medida de massa específica
KOH - Hidróxido de potássio
MgO - Óxido de magnésio
Mg(OH)2 - Hidróxido de magnésio
mm/sem 0.5 - Milímetros por raiz de semana, medida de coeficiente de carbonatação
MPa - Mega Pascal
Na^+ - Íon sódio
NaOH - Hidróxido de sódio
NBR - Norma Brasileira
Nm - Nanômetros
OH^- - Íon Hidroxila
pH - Potencial hidrogênico

r^2 - Coeficiente de correlação estatística
REF - Mistura de referência
RILEM - Réunion Internationale des Laboratoires d' Essais et des Echerces sur lês Matériau et les Constructions
SA - Sílica ativa
SiO2 - Dióxido de silício
U.R. - Umidade relativa do ar em %

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 ..... **17**
1. INTRODUÇÃO **17**
1.1 Justificativa **19**
1.2 Objetivos **22**
1.2.1 Objetivo geral **22**
1.2.2 Objetivos específicos **22**
1.3 Estrutura da Dissertação **23**

CAPÍTULO 2 ..... **24**
2. CARBONATAÇÃO DO CONCRETO **24**
2.1 MECANISMOS DE TRANSPORTE DO CO_2 ..... **28**
2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA CARBONATAÇÃO **29**
2.2.1 Relação água aglomerante **29**
2.2.2 Dosagem e tipo de cimento **30**
2.2.3 Processo de cura **31**
2.2.4 Concentração de CO_2 ..... **32**
2.2.5 Umidade relativa do ar **34**
2.2.6 Temperatura **36**
2.2.7 Teor de hidróxido de cálcio **36**
2.2.8 Resistência à compressão **38**
2.3 ADIÇÕES MINERAIS NO CONCRETO **38**
2.3.1 Ações químicas das adições minerais **40**
2.3.2 Ações físicas das adições minerais **41**
2.3.3 A cinza de casca de arroz **42**
2.3.4 Carbonatação acelerada em concretos com CCA **46**
2.3.5 Teor de hidróxido de cálcio em concretos com CCA **48**
2.3.6 Resistência mecânica em concretos com CCA **49**

CAPÍTULO 3 ..... **52**
3.METODOLOGIA EXPERIMENTAL **52**
3.1 INTRODUÇÃO **52**
3.2 VARIÁVEIS INVESTIGADAS **52**
3.2.1 Variáveis Dependentes **52**
3.2.2 Variáveis Independentes **53**
3.3 MATERIAIS EMPREGADOS **53**
3.3.1 Cimentos e cinza de casca de arroz **53**
3.3.2 Agregados **58**
3.3.3 Aditivo **61**
3.3.4 Água **61**
3.4 TRAÇO DO CONCRETO – DOSAGEM **61**
3.5 ORDEM DE COLOCAÇÃO DOS MATERIAIS NA BETONEIRA **62**

3.6 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA **63**
3.7 ENSAIOS REALIZADOS **66**
3.7.1 Resistência à compressão axial **66**
3.7.2 Ensaio de carbonatação acelerada **67**
3.7.2.1 Determinação dos parâmetros da pré-secagem **68**
3.7.2.2 Pré-secagem **69**
3.7.2.3 Redistribuição da umidade **70**
3.7.2.4 Determinação das profundidades de carbonatação **73**
3.7.2.5 Determinação do coeficientes de carboanatação **75**
3.7.2.6 Ensaio de hidróxido de cálcio remanescente **76**

CAPÍTULO 4 ..... **78**
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS **78**
4.1 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO **78**
4.2 COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO ACELERADA **81**
4.3 COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO X RELAÇÃO A/AG – CPII-Z **83**
4.4 COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO X RELAÇÃO A/AG – CP-IV **85**
4.5 COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO – CPII-Z X CP-IV **87**
4.6 TEOR DE HIDRÓXIDO DA CÁLCIO **89**
4.7 COEF. DE CARBONATAÇÃO EM IGUALDADE DE RELAÇÃO À COMPRESSÃO AXIAL **92**
4.8 TEOR DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO EM IGUALDADE DE RESISTÊNCIA **94**

CAPÍTULO 5 ..... **96**
5. CONCLUSÃO **96**
5.1 PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO **96**
5.2 COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO **96**
5.3 TEOR DE CH X COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO **97**
5.4 COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO EM IGUALDADE DE RESISTÊNCIA **98**
5.5 TEOR DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO EM IGUALDADE DE RESISTÊNCIA **98**
5.6 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS **99**
5.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **100**

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade o concreto é utilizado pelo homem e vem sendo aperfeiçoado no decorrer de sua própria história devido à sua grande versatilidade de aplicação e durabilidade. O Panteão de Roma de 120 dC (Figura 1.1) e o Burj Khalifa em Dubai de 2010 (Figura 1.2) são respectivamente dois exemplos arquitetônicos de durabilidade e tecnologia que o homem busca em materiais capazes de resistir ao tempo e também para construir com alta tecnologia e complexidade.

Figura 1.1 - Panteão de Roma, 120 dC
(Fonte: http://www.studyblue.com).

Figura 1.2 - Burj Khalifa em Dubai, 2010.
(Fonte: http://www.huffingtonpost.fr).

O concreto, depois da água, é o material industrializado mais utilizado pelo homem. A sua grande utilização em construções segundo Metha & Monteiro (2008) dá-se em virtude de sua capacidade de fornecer excelente durabilidade e propriedades mecânicas quando bem dosado e executado a um custo relativamente baixo, sendo um material imprescindível para o progresso da civilização.

Sabe-se que o cimento Portland é um dos seus principais constituintes, e que para a sua obtenção demanda de um grande gasto energético e de recursos não renováveis, sendo

a indústria cimenteira, comparada com os demais materiais constituintes do concreto, a que mais emite CO2 para o meio ambiente. Segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2011), a indústria do cimento contribui com mais de 50% da emissão deste gás devido ao seu processo de produção, que através da descarbonatação (reação físico-química) transforma o calcário em clínquer.

Dados da World Meteorological Organizacion (WMO, 2014) indicam a crescente emissão de CO_2 para o meio ambiente. Atualmente, encontra-se na faixa de 396ppm, sendo entre os anos de 2012 e 2013 registrados a maior média (2,9ppm) desde 1984 (inferior a 1,5ppm). Para isso, medidas de maior impacto devem ser tomadas para que a concentração de CO_2 na atmosfera não atinja os 760ppm previstos para o final do século XXI conforme mostra a figura 1.3.

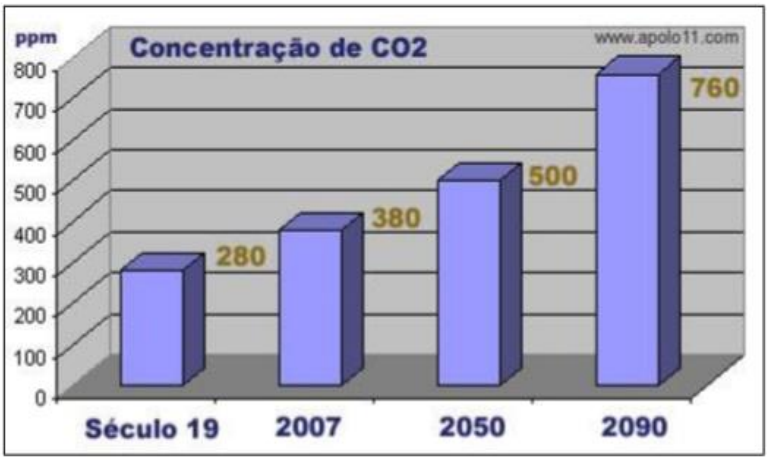


Figura 1.3 – Concentração de gás carbônico na atmosfera.
(http://www.apolo11.com/relogiocarbonico.php).

Isaia et al (2004) colocam que, visando diminuir a poluição, as adições minerais permitem a redução na produção e emanação de CO_2 no processo de fabricação do cimento para a atmosfera, e que, segundo Neville (1997), quanto maior for a emissão, maiores serão as consequências diretas para as estruturas de concreto, pois a profundidade de carbonatação aumenta com a elevação de concentração deste gás na atmosfera. Em vista disto, várias pesquisas utilizando adições minerais como a cinza volante, a sílica ativa, a escória de alto

forno e a cinza de casca de arroz têm sido desenvolvidas nas últimas décadas com o objetivo de reduzir e controlar o consumo de clínquer na composição do concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), cerca de 50 a 70 % da massa de clínquer pode ser substituída por estas adições provenientes de rejeitos industriais e agroindustriais, com ou sem beneficiamento. Com isso, reduz-se a emissão de CO_2 para a atmosfera e a extração de matérias-primas (calcário e argila) obtendo-se ganhos ambientais, sendo estes, um dos maiores desafios deste setor na busca da sustentabilidade, como também, o efeito da carbonatação, uma das principais patologias nas estruturas de concreto armado porque pode provocar a corrosão da armadura desde que previamente despassivada pela ação do CO_2.

Visando analisar o comportamento de concretos com misturas de cimentos compostos e pozolânicos (CPII-Z e CPIV, respectivamente) e adição de cinza de casca de arroz natural residual sem moagem (CCAN) e com moagem (CCAM) frente a carbonatação acelerada, este trabalho pretende contribuir para o conhecimento e uso desta adição em concretos estruturais, colaborar com a sustentabilidade, bem como diminuir a emanação de CO_2 para o meio ambiente pela diminuição do teor de clínquer nos traços de concreto. Segundo Isaia & Gastaldini (2009), as potencialidades técnicas, econômicas e ambientais do uso de misturas de concretos com adições minerais tem por objetivo obter um concreto mais sustentável, reduzindo o consumo de matérias-primas e industriais.

1.1 Justificativa

A preocupação com o desenvolvimento sustentável na construção civil, bem como a durabilidade das estruturas de concreto armado em ambientes agressivos têm sido objeto de várias publicações voltadas para a utilização de resíduos agrícolas ou industriais como, por exemplo, a cinza volante gerada na produção de energia termelétrica, para a produção de concretos. Estes resíduos como a escória granulada de alto forno, a cinza volante, a sílica ativa e a cinza de casca de arroz, bem como suas combinações, conforme Neville (1997), cada vez mais serão utilizados no futuro, pois o cimento é um aglomerante muito caro e que estes resíduos podem produzir concretos com melhor desempenho. Entre os diversos resíduos e subprodutos existentes tem-se observado, devido ao seu potencial (reatividade), a crescente utilização em trabalhos científicos da *cinza de casca de arroz* (CCA), considerada por alguns

pesquisadores como uma *pozolana altamente reativa* (Metha, 1994), quando obtida sob queima com temperatura controlada.

Conforme Food and Agriculture Organization (FAO, 2006), a Ásia é o maior produtor mundial de arroz (90,5%), seguido das Américas (5,9%), África (3%) e Oceania (0,16%), sendo este cereal responsável por 20% da fonte de energia alimentar da população mundial. O Brasil destaca-se neste contexto como o maior produtor ocidental, sendo o Rio Grande do Sul o maior produtor do território nacional, com percentuais superiores a 50%. Segundo dados do IRGA (2014), a produção nacional 2012/2013 foi de 11.746.600 toneladas de grãos. A produção no Rio Grande do Sul, neste mesmo período, foi de 8.069.903 toneladas.

A porcentagem de casca de arroz gerada da produção deste cereal é de 20% e que a CCA obtida após a queima da casca atinge um percentual cerca de 4% da massa do arroz. Isto geraria somente no Rio Grande do Sul 1.614.000 toneladas de casca de arroz e 323.000 toneladas de CCA (in natura) da safra 2012/2013, tornando-o em função deste volume gerado, um potencial fornecedor deste resíduo para a produção de CCA e com possibilidades de seu emprego em escala industrial como material pozolânico para indústria do concreto.

Segundo Isaia (1999), a utilização destes resíduos como adição mineral, muitas vezes descartado diretamente na natureza, contribui não só para a conservação de energia (menor consumo de cimento) e de recursos minerais (extração de calcário e argila) cuja exploração atinge o meio ambiente, como também, torna-se um modo seguro e barato de retirar as cinzas da superfície do solo. De acordo com o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2009), o setor da construção civil exerce grande impacto sobre o meio ambiente consumindo cerca de 50 a 75% dos recursos naturais extraídos do planeta, desconsiderando água e energia.

Sendo assim, a utilização de CCA em substituição de parte do cimento na constituição do concreto, além de colaborar com o meio ambiente na redução da emissão de CO_2, tem se mostrado benéfica quanto a durabilidade deste material devido ao potencial reativo que possui como material pozolânico, como atestam inúmeros trabalhos publicados na literatura. Porém, depende da sua origem e processo de queima (com ou sem controle de temperatura) para que a sílica presente na sua composição, quando amorfa, seja mais reativa quando na presença do hidróxido de cálcio da pasta do concreto. As alterações que as CCA promovem na microestrutura do concreto devido ao refinamento dos poros e dos grãos fazem com que sua

compacidade seja maior gerando uma estrutura mais densa e homogênea, e por consequência, menos suscetível a ação de agentes agressivos.

Metha e Monteiro (2008), consideram a permeabilidade a chave para a durabilidade, pois esta controla a carbonatação, o ingresso de cloretos, oxigênio e umidade, fatores que influem no processo de corrosão da armadura do concreto. Por outro lado, pesquisas atestam que o emprego de CCA e outras adições minerais ativas no concreto podem aumentar o coeficiente de carbonatação. Isto acontece devido ao consumo dos álcalis livres ou combinados resultantes da hidratação do clínquer que a reação pozolânica consome, reduzindo a alcalinidade da pasta.

Sabe-se que a carbonatação ocorre devido a presença de CO_2 na atmosfera. É definida como um processo físico-químico que progride no interior das estruturas através da penetração deste gás da superfície externa para o interior do concreto. Seu principal efeito pela redução da alcalinidade (pH) é a despassivação da armadura, que deixa o aço desprotegido e susceptível a corrosão. Segundo Parrot (1987), quanto maior for sua presença (CO_2), maior será sua profundidade nas estruturas de concreto.

Várias pesquisas realizadas no mundo como os estudos de Metha e colaboradores na Universidade da Califórnia, em Berkeley; na Ásia, devido à grande produção de arroz e no Brasil pelos pesquisadores Dafico Alves (UFG), João H. Silva (UnB), Silvia Santos (UFSC), Maria T. Pouey (UFRGS) entre outros, atestam a viabilidade da CCA como adição mineral para concreto estrutural, porém, nenhuma com a utilização da cinza de casca de arroz residual sem moagem (CCAN) e sem controle de temperatura.

O GEPECON/UFSM, através de sua equipe vem realizando pesquisas sobre a resistência e durabilidade de concretos com adições minerais a mais de 20 anos, principalmente com o uso de cinza volante e de CCA beneficiada (ISAIA, 1992, VAGUETTI, 1999, VENQUIARUTO, 2002, SPERB, 2003, STUMPP, 2003, DALLA LANA, 2005, CADORE, 2008, BARIN, 2008, MARTINELLI JR., 2010, TASCA, 2012), com o objetivo de verificar a influência da mesma sobre a carbonatação do concreto. Existe, entretanto, uma lacuna ainda a ser investigada ocasionada pela falta de estudos e pesquisas laboratoriais que confirmem a possibilidade de emprego da CCA residual “in natura”, em concretos para fins estruturais, quando a variável de durabilidade é a carbonatação.

Portanto, essa dissertação investigou este fenômeno através de uma pesquisa inserida no Projeto-Programa PROSUL denominado “Produção de concreto estrutural com cinza de

casca de arroz in natura, sem beneficiamento", com o objetivo de avaliar o desempenho da CCAN (cinza de casca de arroz natural) frente a carbonatação acelerada.

A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em parceria adotada com a Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA / Brasil), Universidad de La Republica (UDELAR/Uruguai) e o Laboratório de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT/ Argentina) desenvolveram pesquisas relacionadas à resistência e durabilidade de concretos para fins estruturais com a adição deste tipo de resíduo.

A presente pesquisa faz parte da fase IV do projeto referido acima. Esta fase teve como objetivo a utilização dos cimentos CPII-Z e CPIV devido as reações álcali-sílica, detectadas quando da substituição do cimento CPII-F por cinza de casca de arroz natural utilizado nas fases anteriores deste projeto. Em vista disso, esta pesquisa pretende avançar no estudo da viabilidade técnica do uso da CCAN residual sem moagem e assim contribuir para a sustentabilidade e durabilidade de concretos estruturais quando submetidos à carbonatação acelerada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa foi verificar a viabilidade do emprego da cinza de casca de arroz natural (CCAN) sem beneficiamento ("in natura") como adição mineral em concretos estruturais com dois diferentes tipos de cimento Portland (CPII-Z e CP-IV) frente à carbonatação acelerada e teor de hidróxido de cálcio remanescente.

1.2.2 Objetivos Específicos

a) Verificar os resultados e analisar a influência das relações a/ag de 0,45; 0,55 e 0,65 nas profundidades e coeficientes de carbonatação dos concretos com e sem adições de CCA (natural e moída) para as misturas de CPII-Z e CP-IV.

b) Comparar os coeficientes de carbonatação acelerada obtidos entre as misturas de cinza de casca de arroz natural (CCAN) e moída (CCAM), com os concretos de

referência em igualdade de relação a/ag.

c) Verificar o teor de hidróxido de cálcio remanescente (CH) sobre os coeficientes de carbonatação acelerada (Kc) das misturas investigadas.

d) Observar o comportamento das variáveis a), b) e c), em igualdade de resistência à compressão axial para as classes de concreto C20, C25 e C30.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos:

• O primeiro capítulo trata sobre a introdução, justificativa e os objetivos da pesquisa, como também, a estrutura do trabalho.

• O segundo capítulo aborda uma revisão teórica sobre os mecanismos, suas variáveis intervenientes e a presença de CCA no processo da carbonatação.

• O terceiro capítulo trata da metodologia empregada no experimento com apresentação da caracterização dos materiais, descrição e as variáveis de estudo, como também dos métodos e processos utilizados para a realização dos ensaios.

• O quarto capítulo aborda os resultados obtidos e suas respectivas análises e discussões, como também, a comparação destes com outras pesquisas realizadas sobre o tema.

• Por fim, o quinto capítulo trata das conclusões e propõe sugestões para futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2

2. CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

A carbonatação é um fenômeno que acontece naturalmente nas estruturas de concreto e que ocorre devido a presença de gás carbônico e umidade na atmosfera. Apontada por diversos pesquisadores como uma das principais manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado, juntamente com o ataque por cloretos, tem como consequência, a redução da sua durabilidade e que, segundo Kazmierczak (1993), é um fator preponderante no desencadeamento da corrosão das armaduras.

Definida como um processo físico-químico que progride lentamente no interior das estruturas de concreto através da penetração do CO_2 da superfície externa para a interna, a carbonatação depende basicamente, conforme literatura, do processo físico, que é governado pela estrutura da rede de poros (tamanho, distribuição, interconectividade e tortuosidade) e que controla o processo de difusão do CO_2, e do processo químico, decorrente da reação do CO_2 com o CH e outros sólidos carbonatáveis como NaOH e KOH (álcalis do cimento) e, posteriormente, o C-S-H (a longo prazo) na fase aquosa da solução dos poros (ISAIA, 1999).

O principal efeito da carbonatação segundo Metha e Monteiro (2008) é a redução da alcalinidade do concreto, ou seja, seu pH (potencial hidrogênico) que originalmente se encontra acima de 12,5 reduz-se para valores inferiores a 8,5, quando o hidróxido de cálcio se transforma em carbonato de cálcio. A figura 2.1 apresenta esquematicamente o processo da carbonatação que ocorre a partir da superfície, dividindo o processo em duas zonas mais ou menos distintas, uma possui pH superior a 12 e outra inferior a 9 e uma terceira intermediária denominada de zona de neutralização.

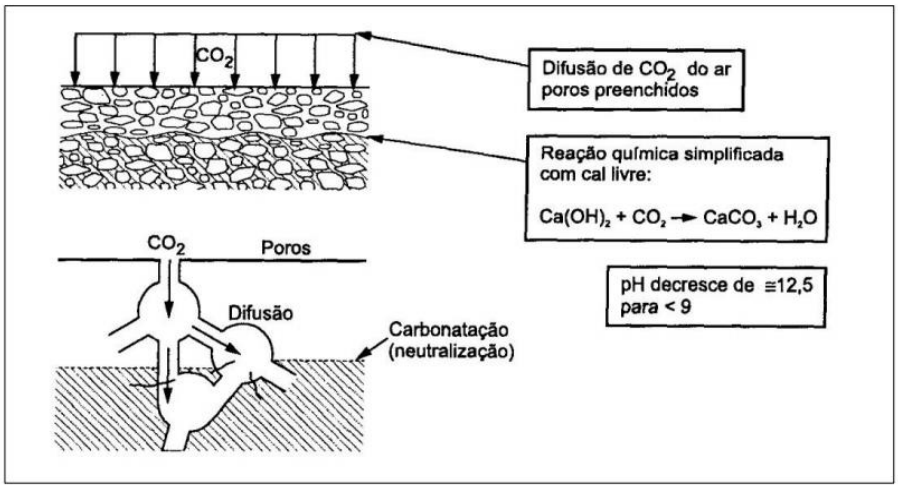


Figura 2.1 - Esquematização do fenômeno da carbonatação –
(BACKER, 1988 adaptado por CASCUDO, 2005)

A redução da alcalinidade através do consumo de hidróxido de cálcio na solução dos poros do concreto traz como consequência, se atingida, a despassivação da armadura, que deixa o aço desprotegido e susceptível a corrosão, pois a medida que o consumo de $Ca(OH)_2$ livre e de outros álcalis ou compostos de cálcio aumenta, avança a frente de carbonatação.

A figura 2.2, mostra o avanço da frente de carbonatação até atingir a armadura podendo deflagrar o processo de corrosão devido a sua despassivação.

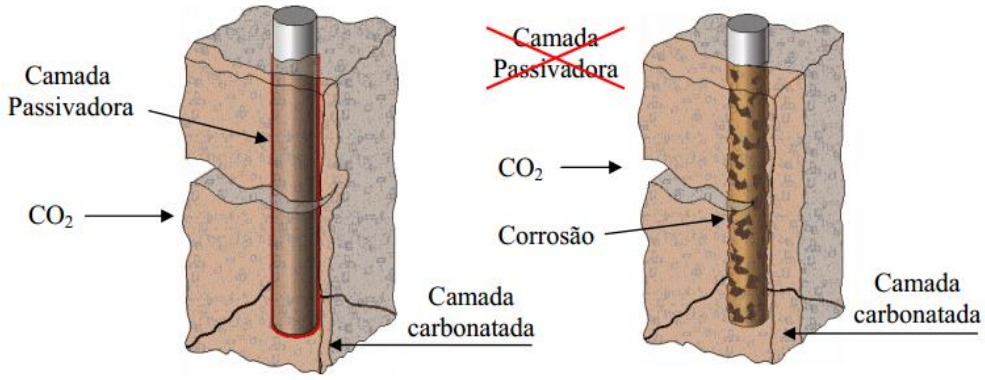


Figura 2.2 - Representação do avanço da frente de carbonatação (TULA, 2000).

HELENE (1993) descreve que:

> a armadura dentro do concreto normalmente encontra-se protegida da corrosão devido à alta alcalinidade deste material (pH entre 12,7 e 13,8). Este nível de pH favorece a formação de uma camada de óxidos submicroscópica passivante, compacta e aderente sobre a superfície da armadura. Essa camada protege a mesma de qualquer sinal de corrosão, desde que as condições de potencial e pH mantenham-se estáveis. No entanto, esta passividade pode ser destruída pela penetração de agentes agressivos (CO_2, Cl-, entre outros) que podem alterar as condições acima referidas, com a alteração do pH junto à armadura de forma generalizada ou pontual.

Segundo Papadakis; Vayenas; Fardis (1989), a carbonatação ocorre essencialmente pela difusão do CO_2 na fase gasosa dos poros onde, posteriormente, se dissolvem na água dos poros formando o ácido carbônico conforme a equação 2.1.

$$CO_2 + H_2O \longrightarrow H_2CO_3 \qquad \text{(Equação 2.1)}$$

O comportamento do ácido carbônico na água é de um diácido fraco, sendo sua dissociação em duas fases conforme as equações 2.2 e 2.3.

$$H_2CO_3 + OH^- \longrightarrow HCO_3^- + H_2O \qquad \text{(Equação 2.2)}$$

$$HCO_3^- + OH^- \longrightarrow CO_3^{2-} + H_2O \qquad \text{(Equação 2.3)}$$

A passagem de CO_2 em solução conforme as equações 2.1, 2.2 e 2.3 provoca a diminuição de concentração de íons OH^- na solução intersticial do poros rebaixando o pH. A alcalinidade é reestabelecida através da dissolução do $Ca(OH)_2$ na água dos poros e difusão do mesmo das regiões de maior para menor alcalinidade conforme equação 2.4.

$$Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca^{2+} + 2OH^- \qquad \text{(Equação 2.4)}$$

A equação 2.5 mostra a reação do CO_2 dissolvido com o $Ca(OH)_2$ dissolvido e a precipitação do carbonato de cálcio.

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \longrightarrow CaCO_3 \qquad \text{(Equação 2.5)}$$

A principal reação química no processo da carbonatação de acordo com Smolczyk (1969) ocorre com o hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$. Este é consumido pelo dióxido de carbono CO_2 e na presença de umidade (vapor de H_2O) se transforma em carbonato de cálcio $CaCO_3$ conforme simplificação da equação 2.6.

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad \text{(Equação 2.6)}$$

Os demais compostos alcalinos provenientes da hidratação do cimento e presentes na solução dos poros como o hidróxido de potássio KOH e o hidróxido de sódio NaOH também são carbonatáveis e estão representados pelas equações 2.7 e 2.8 (PAPADAKIS, VAYENAS E FARDIS, 1991).

$$2KOH + CO_2 \longrightarrow K2CO_3 + H_2O \qquad \text{(Equação 2.7)}$$

$$2NaOH + CO_2 \longrightarrow NaCO_3 + H_2O \qquad \text{(Equação 2.8)}$$

Assim como os silicatos alcalinos, o silicato de cálcio hidratado C-S-H, o silicato tricálcico C_3S e o silicato dicálcico C_2S não hidratados representados pelas equações 2.9, 2.10 e 2.11 (PAPADAKIS, VAYENAS E FARDIS, 1991).

$$3CaO.2SiO_2 + 3H_2O + 3CO_2 \longrightarrow 3CaCO_3.SiO_2.3H_2O \qquad \text{(Equação 2.9)}$$

$$3CaO.2SiO_2 + 3H_2O + nH_2O \longrightarrow SiO_2.nH_2O + 3CaCO_3 \qquad \text{(Equação 2.10)}$$

$$2CaO.SiO_2 + 2CO_2 + nH_2O \longrightarrow SiO_2.NH_20 + 2CACO_3 \qquad \text{(Equação 2.11)}$$

A associação da carbonatação com os processos físicos-químicos (equações) citados estão descritas na literatura de forma detalhada nos trabalhos dos autores mencionados, assim como, no de Backer (1988).

2.1 MECANISMOS DE TRANSPORTE DO CO_2

A velocidade de propagação da frente de carbonatação depende dos mecanismos de transporte envolvidos no processo como a absorção capilar, a permeabilidade e a difusão, sendo estes, dependentes dos tipos de agentes agressivos (dióxido de carbono, cloretos, sulfatos, etc.) que agem isoladamente ou em conjunto, assim como das condições ambientais e das características das misturas do concreto, podem facilitar ou dificultar a progressão para o seu interior (NEVILLE, 1997; CASCUDO, 1997; HOUST e WITTMANN, 2002).

A difusão, segundo Metha e Monteiro (2008), é o principal mecanismo de transporte de CO_2 para o interior do concreto porque está diretamente relacionada com a porosidade deste material e da diferença de concentração entre o teor deste gás no meio ambiente e no interior dos poros.

Isaia (1999) coloca também que, a velocidade da difusão para o interior do concreto depende da quantidade de hidróxido de cálcio que é liberado nas reações de hidratação do cimento e pela modalidade e quantidade de água presente nos poros, porque a carbonatação avança conforme o teor de umidade dos mesmos quando estão parcialmente cheios, e que corresponde a uma umidade relativa na faixa de 50 a 80%.

Portanto, segundo Cascudo (1997), somente ocorrerá a carbonatação através da difusão do CO_2 quando os poros estiverem parcialmente cheios d'água e este gás avançar através da rede de poros até onde a solução apresentar condição favorável ao fenômeno. Se os mesmos estiverem totalmente secos ou saturados a difusão dos gases não ocorre pela falta ou excesso de água. Este fato também ocorre, com a umidade relativa abaixo de 25%, onde a água existente nos poros do concreto é insuficiente para que o CO_2 forme o ácido carbônico e também avance para o interior do concreto.

2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA CARBONATAÇÃO

O estudo da carbonatação é bastante complexo e vem sendo pesquisado há várias décadas com a intenção de promover maior conhecimento deste fenômeno e contribuir com a durabilidade das estruturas de concreto armado. Para tal, serão tratados a seguir, os fatores que influenciam e determinam diretamente o avanço da frente de carbonatação.

2.2.1 Relação água/aglomerante

O aumento da porosidade e da permeabilidade do concreto está diretamente relacionada com a relação água/aglomerante. Nesta variável, quanto maior for a relação a/ag empregada no traço do concreto para uma mesma idade de ensaio, maior será a sua profundidade carbonatada. Estudos de Helene et. al. (1999) conforme mostra a figura 2.3 comprovam esta relação, e também concluem que, para diferentes tipos de concretos (com o mesmo tipo de cimento) e valor de abatimento iguais, a profundidade de carbonatação aumentou com o aumento da relação a/ag.

Este fato ocorre, conforme Parrot (1987) e Castro (2003), devido a facilidade que o CO_2 encontra para penetrar na estrutura física da pasta de cimento e que, quanto maior for a sua interconectividade, maior será a velocidade de difusão do CO_2 para o interior do concreto aumentando a profundidade de carbonatação.

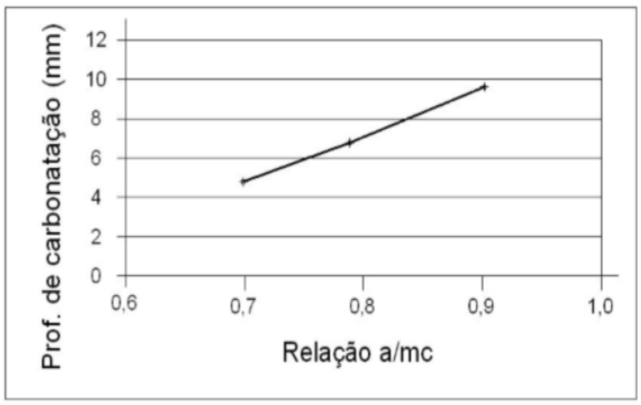


Figura 2.3 - Profundidade de carbonatação X relação a/ag (HELENE et.al. 1999).

Isaia (1999) coloca também que, além da relação a/ag, diferentes tipos de adições minerais no concreto promovem diferentes estruturas da pasta, e que estas, alteram a velocidade de difusão modificando as relações entre grau de porosidade e resistência mecânica para um mesmo nível de resistência.

Estudo realizado pelo mesmo autor (ISAIA, 1995) apresenta que, para onze misturas binárias e ternárias de pozolanas, com teores de substituição de cimento entre 10 e 50%, e mesmo nível de resistência (60 MPa), o coeficiente de carbonatação aumentou 122 vezes, entre o maior e o menor valor encontrados, para cura prévia de 28 dias. Esse resultado revela que os diferentes graus de porosidade são encontrados para a mesma resistência, o que torna aconselhável a comparação dos parâmetros que definem a durabilidade do concreto pelo critério da resistência e não pelo da relação a/ag.

2.2.2 Dosagem e tipo de cimento

Concretos de cimento Portland comum (sem adições minerais) possuem maior reserva alcalina quando comparados com concretos de cimentos Portland com adições minerais. Este fato ocorre devido aos elevados teores de álcalis e compostos hidratados presentes na pasta (de cimento Portland puro) que torna a difusão do CO_2 mais lenta e, para que possa avançar, primeiro precisa rebaixar o pH e assim consumir o hidróxido de cálcio existente (HELENE et al, 1995).

Conforme Isaia, Vaguetti e Gastaldini (1998), cimentos com adições minerais apesar de propiciarem um maior refinamento dos poros e dos grãos, aumentando a tortuosidade dos capilares e diminuindo a permeabilidade, são mais velozes em relação ao cimento Portland comum frente a carbonatação, devido ao menor teor de CH remanescente. Esse efeito de refinamento da microestrutura depende do nível de resistência da pasta cimentícia, sendo maior para resistências menores (concretos convencionais – até 50MPa) e menor para concretos de alto desempenho (acima de 50MPa).

Parrot (1996) evidencia que concretos com adições minerais devido a diminuição de CH remanescente devido as reações pozolânicas apresentam predisposição para maiores profundidades de carbonatação, quando comparados

com concretos de referência (sem adição mineral).

Trabalhos de Venquiaruto (2002), comprovam este fato, assim como os de Isaia (1995) e Vaguetti (1999), que estudaram respectivamente, a cinza de casca de arroz (CCA), cinza volante (CV), sílica ativa (SA) e escória de alto forno (E) em misturas binárias e ternárias e a CCA, CV e SA com teores de substituição de 10 a 50% de cimento. Ambos verificaram que, com o aumento dos teores de substituição de cimento por uma ou mais adições minerais, aumentaram as profundidades de carbonatação devido a menor reserva alcalina apresentada pelas mesmas quando comparadas com concretos sem adições minerais, devido ao menor conteúdo de clínquer e, logo, de CH.

Estudos de Khunthongkeaw (2006) et al. com diferentes tipos de adições de cinza volante frente a carbonatação natural e acelerada comprovam que teores de substituição acima de 25% aumenta a velocidade de carbonatação, ao mesmo tempo que, quando os teores estão abaixo de 10% o aumento foi insignificante, assemelhando-se ao concreto sem adições (convencional), vindo a confirmar as proposições de Isaia, Vaguetti e Gastaldini (2001), Kulakowski (2002), Castro (2003) e Martinelli Jr. (2010).

Portanto, segundo Helene et al. (1995), verifica-se que o tipo e quantidade de cimento influenciam na profundidade de carbonatação e que a aparente desvantagem das adições minerais no cimento pode ser minimizada com uma cura úmida adequada e pela redução da porosidade e permeabilidade do concreto, dificultando a penetração de agentes agressivos como o CO_2.

2.2.3 Processo de cura

As condições cura, principalmente o tempo de cura úmida influencia diretamente na durabilidade do concreto, pois segundo Helene et al. (1995), esta afeta as condições de hidratação da pasta nos primeiros milímetros superficiais.

Segundo Figueiredo et. al. (1993) quanto maior for o tempo de cura úmida mais compacta será a microestrutura e consequentemente menor a sua profundidade de carbonatação. Isto ocorre devido ao maior grau de hidratação

do cimento que diminui a porosidade e a permeabilidade do concreto superficial devido à redução da conectividade da rede de poros. Para Pauletti (2004), a cura tem um papel fundamental no desenvolvimento da carbonatação do concreto, principalmente quando elaborados com CCA em substituição ao cimento Portland.

Pesquisas de Parrot (1996), Fattuhi (2002) e Castro (2003) comprovam a importância do tempo de cura úmida deste material ao longo de sua vida útil quando submetido a carbonatação.

Castro (2003) pesquisou a carbonatação acelerada em diferentes tipos de adições minerais entre elas a CCA com teor de substituição de 10% curados ao ar e em câmara úmida. Os resultados obtidos para os concretos curados ao ar apresentaram coeficientes de carbonatação superiores quando comparados com os curados em câmara úmida. Da mesma maneira, as pesquisas de Parrot (1996) quando utilizou três períodos de cura úmida 1, 3 e 28 dias e 17 tipos de cimento e Fattuhi (2002), com 1, 3, 7, 21 e 28 dias e cimento Portland puro, verificaram que, com o aumento dos períodos de cura úmida, houve uma redução das profundidades de carbonatação.

Dentro deste contexto verifica-se que uma cura bem executada e por um período maior de tempo minimiza as reações de carbonatação, principalmente quando ocorre a incorporação de adições minerais como a CCA residual. Segundo Hoppe (2008) et. al., o efeito negativo do consumo do CH é compensado através do aumento da compacidade e o refinamento dos poros devido ao pleno desenvolvimento das reações pozolânicas e formação do C-S-H secundário que a cura úmida prolongada proporciona aos concretos constituídos com essas adições.

2.2.4 Concentração de CO_2

A velocidade de carbonatação está ligada diretamente com a concentração de CO_2 no meio ambiente o que, segundo Parrot (1987), pode influenciar significativamente na profundidade carbonatada devido ao aumento, nos últimos anos, da concentração deste gás na atmosfera.

Sabe-se que a penetração do CO_2 para o interior do concreto ocorre basicamente pela difusão deste gás, e que este processo ocorre devido a diferença de concentração entre os dois meios. Dessa forma, quanto maior for o gradiente de concentração apresentados pelos dois ambientes, maior será a velocidade de penetração deste gás para o interior do concreto. Outro aspecto é a concentração de CO_2 entre ambientes abertos e fechados.

Segundo Helene (1993), quando se compara ambientes abertos e fechados altera-se significativamente a concentração de CO_2, sendo a taxa de carbonatação de ambientes abertos menores que do fechado devido a constante renovação do ar úmido. O mesmo autor coloca que a taxa de concentração de CO_2 no ar pode variar de 0,03 a 0,05% para atmosferas rurais, de 0,30% para grandes cidades, de 0,10 a 1,20% para tráfego pesado, assim como laboratórios não ventilados e garagens, cujos valores podem chegar até 0,10% e 1,80% respectivamente.

Também é importante ressaltar a diferença entre as taxas de concentrações de CO_2 presentes nos ensaios da carbonatação natural (ambiente) e acelerada. Em estudo comparativo de concretos ensaiados em carbonatação acelerada com 10% de CO_2 em câmara condicionada e em ambiente de laboratório por dois anos, Isaia et. al. (2001) ao estabelecer relações entre os coeficientes de carbonatação natural e acelerada concluiram que as misturas com substituição de até 25% de pozolanas os coeficientes foram equivalentes na relação de 1,0mm/sem^{0,5} = 1,0mm/ano^{0,5}, sendo para as misturas com teores de substituição de 50% a relação passou para 1,0mm/sem^{0,5} = 3,6mm/ano^{0,5}. Segundo os mesmos autores, o aumento da velocidade de carbonatação dos ensaios acelerados quando comparados com os ambientais podem ser explicados devido a menor reserva alcalina das misturas e a variação do teor de CO_2 e umidade do concreto quando exposto ao meio natural, o que não acontece em ambiente controlado.

Verificando a influência do teor de CO_2 no avanço da frente de carbonatação no concreto, Uomoto e Takada (1993), utilizaram concentrações de CO_2 de 0,07% para ambiente natural (interno) e 1 e 10% para ensaio acelerado e relações água/cimento de 0,50, 0,60 e 0,70 sob temperatura e umidade controlados (T=20°C e UR=55%) e concluiram que, com o acréscimo do teor de CO_2 a velocidade de carbonatação aumentou, sobretudo, para as misturas com

maior relação água aglomerante.

Conforme Dal Molin (2005), para a realização de ensaios de carbonatação acelerada, os teores de CO_2 devem ser inferiores a 6% pois segundo a autora teores elevados tendem a alterar seu comportamento e produzir profundidades de carbonatação inferiores.

Castellote et al. (2008), ao estudarem as transformações químicas de pastas de cimento Portland comum em ensaios acelerados, em ambientes com teores de CO_2 de 0,03 até 100%, constataram que teores até 3% de CO_2 se comportam de modo similar a carbonatação natural, com relação C/S de 1,87. Acima deste valor essa relação decai para em torno de 1,0 com a carbonatação do C-S-H e etringita em proporção ascendente com o teor de CO_2.

Conclui-se assim que, a concentração de CO_2 no ambiente é preponderante no estudo da carbonatação do concreto, assim como, a sua associação a outros fatores ambientais (UR) que facilitam a difusão do CO_2 para o interior da matriz cimentícia.

2.2.5 Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar influencia diretamente o grau de saturação da rede de poros do concreto. Segundo Papadakis et. al.(1992) para que ocorram as reações de carbonatação, é decisivo o grau de saturação dos poros do concreto, pois a difusão do CO_2 é fortemente influenciada pela quantidade de água presente na sua estrutura.

Parrot (1994) declara que, com elevados teores de umidade (70 a 90%) os poros ficam preenchidos de água, restringindo o ingresso de CO_2 para o interior do concreto. Sobre este fato Kazmierczak e Helene (1993) et. al, afirmam que, em concretos com teores de umidade acima de 80%, o processo de carbonatação quase não ocorre devido à baixa difusão do CO_2 na água que é cerca de 10^4 vezes menor no ar. É consenso que a difusão do CO_2 é maior na faixa entre 50 e 80%, decrescendo a medida que a umidade se aproxima da saturação dos poros.

Por outro lado, segundo Van Balen et.al (1994), a difusão em poros de

umidades baixas ou até excessivamente secos não ocorre por falta do agente de transporte (eletrólito) do gás para o interior do concreto, onde, por mais que o gás penetre com facilidade, as moléculas de H_20 aderidas aos poros capilares são insuficientes para reagir com o CO_2.

De acordo com Bakker (1988) a difusão do CO_2 pode ocorrer conforme a figura 2.4, onde: na figura 2.4(a) – ocorre a difusão do CO_2, porém não ocorre a carbonatação pela ausência da água. Já na figura 2.4(b) – a reduzida taxa da difusão do CO_2 na água (saturação dos poros) faz com que praticamente não ocorra a carbonatação. E por fim, na figura 2.4(c) – a difusão do CO_2 é maior, pois os poros parcialmente saturados de água permitem as reações de carbonatação. Neste último caso, a difusão é mais acentuada devido as tensões superficiais entre a parede sólida e as moléculas solubilizadas de CO_2, e que estas podem ser medidas por meio da intensidade do potencial zeta (ISAIA, 1999).

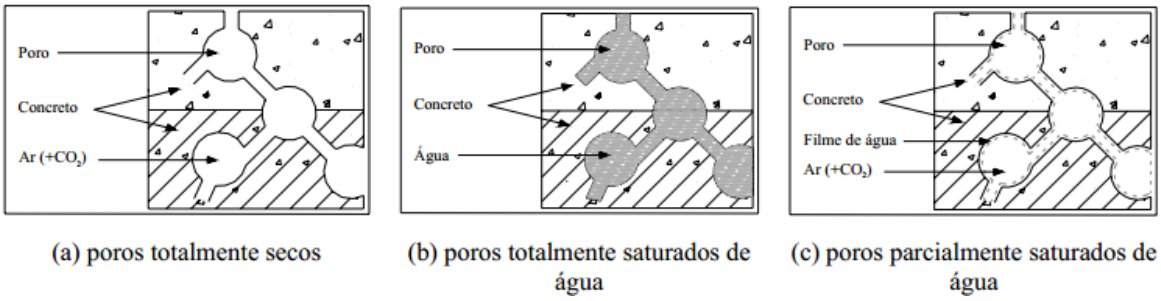


Figura 2.4 – Representação esquemática da difusão do CO2
(BAKKER, 1988 adaptado por POSSAN 2010).

Para tal, há de se considerar também, segundo Isaia (1998) e Cadore (2008) e Hoppe (2008), que a umidade relativa no interior do concreto é bastante complexa devido aos ciclos de umidecimento e secagem que as estruturas de concreto podem estar expostas, e que, a carbonatação de peças estruturais abrigadas do tempo (umidade e temperatura controladas) como também dos ensaios em câmaras condicionadas tendem a apresentar velocidade de carbonatação mais elevada do que as expostas as intempéries, onde estão à mercê da ação de chuvas e neblinas.

2.2.6 Temperatura

A temperatura pode afetar a reação de carbonatação pois influencia na solubilidade dos componentes e o processo de difusão do CO_2. Enquanto a solubilidade do CO_2 diminui com o aumento da temperatura, as reações químicas se processam mais rápido com o aumento destas (VAN BALEN, 1994), e com isso, aumenta o consumo de reserva alcalina no interior do concreto.

Conforme estudos de Papadakis, Vayenas e Fardis (1991) temperaturas entre 20°C e 40°C não influenciam na carbonatação, pois nestes níveis, o processo é controlado pela difusão.

Neville (1997), compartilha da ideia de que pequenas variações de temperatura não são significativas como a concentração de CO_2 e que estas exercem pouca influência no processo de carbonatação do concreto.

Roy et.al (1993), apresentam ideia de oposição, onde afirmam que a temperatura influencia de forma significativa o avanço da carbonatação. Analisando a profundidade de carbonatação para concretos com o mesmo nível de resistência à compressão e para diferentes localidades, o autor verificou que em Singapura, onde a temperatura média é de aproximadamente 28°C as profundidades de carbonatação foram 70% superiores às do Reino Unido e Europa em geral, onde a temperatura média é de 8 e 9°C.

2.2.7 Teor de hidróxido de cálcio

O teor de hidróxido de cálcio (CH) tem fundamental importância na velocidade de carbonatação. Quanto maior o teor de CH na composição do concreto, maior será a reserva alcalina disponível, e com isso, mais lenta será a velocidade da frente de carbonatação devido ao maior teor de CH a ser consumido pelas reações de cabonatação.

Para Isaia (1999), o progresso da carbonatação no concreto depende, além dos expostos anteriormente e suas correlações, do tipo e quantidade de CH que é liberado nas reações de hidratação do cimento, pois, como composto solúvel, o

hidróxido de cálcio reage com os sais alcalinos de potássio e sódio do clínquer, formando compostos solúveis de hidróxido de sódio, potássio e cálcio, que em idades avançadas regulam a alcalinidade na solução dos poros. A presença desses reguladores da alcalinidade do concreto, segundo o mesmo autor, retarda o processo da carbonatação e consequentemente a sua degradação.

Em pesquisa realizada com misturas binárias e ternárias de sílica ativa, cinza volante e cinza de casca de arroz, Isaia, Vaguetti e Gastaldini (1998) observaram que o teor de CH remanescente foi menor quanto maior os teores de substituição de cimento por estas adições (Figura 2.5).

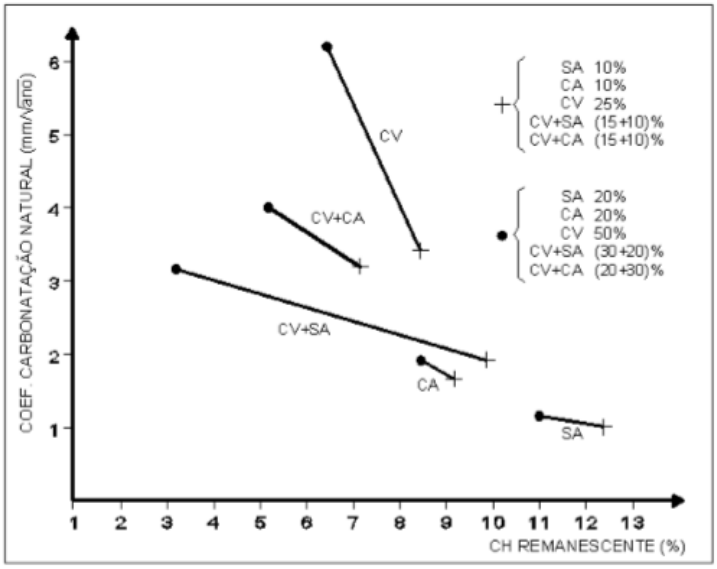


Figura 2.5 – Correlação entre o coeficiente de carbonatação natural e o teor de hidróxido de cálcio remanescente para nível de resistência de 70MPa (ISAIA, VAGUETTI & GASTALDINI, 1998).

Vaguetti (1999), constata tal correlação onde, para as mesmas misturas utilizadas em pesquisa anterior com Isaia e Gastaldini (1998), a mistura de referência (100% de cimento Portalnd) apresentou o menor coeficiente de carbonatação devido a maior reserva de CH presente na mistura.

Para Neville (1997), a redução do pH da solução dos poros, devido ao consumo do CH pelas reações pozolânicas, faz com que a película passivadora do aço seja removida, podendo levar ao início do processo da corrosão das armaduras.

2.2.8 Resistência à compressão

A resistência à compressão axial possui uma relação direta com a relação a/ag, e também serve de parâmetro para comparar as profundidades e os coeficientes de carbonatação.

Parrot (1997), vê na resistência à compressão axial uma alternativa para se determinar as profundidades de carbonatação, pois estas estão mais disponíveis e que as diferenças das relações a/ag podem ser representadas por essa variável. Porém, enfatiza que, a carbonatação não pode ser comparada somente por esta variável (resistência), mas também devem-se observar outros fatores dependentes como a compacidade da pasta, o conteúdo total de hidróxido de cálcio para reagir com o CO_2, condições de cura, concentração de dióxido de carbono entre outros.

Em pesquisas sobre a relação da resistência à compressão axial nas profundidades e coeficientes de carbonatação para concretos com adição de cinza volante, com diferentes períodos de cura e tempo de exposição ao CO_2, Kokubu e Nagataki (1989), Ohga e Nataki (1989) e Nagataki, Ohga e Kim (1991) verificaram que existe uma correlação linear entre estas variáveis, onde concluíram que, com o aumento da resistência (para um determinado tipo de concreto) ocorre uma diminuição das profundidades e coeficientes de carbonatação.

Isaia, Vaguetti e Gastaldini (1998) com o mesmo objetivo, estudaram misturas binárias de sílica ativa (10% e 20%), cinza volante (25% e 50%), cinza de casca de arroz (25% e 50%) e ternárias CV+AS (15+10% e 30+20%) e CV+CA (10+15% e 20+30%) onde também verificam esta relação, concluindo que para o mesmo nível de resistência os coeficientes de carbonatação variaram do menor para o maior coeficiente, entre as misturas estudadas, de 122 vezes aos 28 dias e 97 vezes aos 91 dias. Nessa pesquisa, à medida que se substituiu o teor de cimento pelas adições minerais, também reduziu-se a relação a/ag com o objetivo de alcançar resistência mecânica próxima a 60MPa.

2.3 ADIÇÕES MINERAIS NO CONCRETO

A preocupação ambiental e com o desenvolvimento sustentável na construção civil tem sido objeto de várias publicações voltadas para a utilização de adições minerais no concreto. Pesquisadores buscam o aproveitamento destes resíduos como a cinza de casca de arroz, cinza volante, escória de alto forno, sílica ativa, filer calcário, entre outros, provenientes de processos agrícolas ou industriais com o objetivo de reduzir e controlar o consumo de clínquer no concreto, reduzindo assim a extração de matérias-primas como o calcário e argila para a produção do cimento, como também, dar um destino a estes resíduos muitas vezes descartados diretamente na natureza.

Segundo Metha (1997), fatores econômicos e ambientais têm colaborado para a intensificação na utilização de adições minerais no concreto ou como constituintes para a produção de cimentos compostos, sendo a indústria da construção civil a mais indicada para utilizá-los devido a sua atividade pozolânica.

Uma pozolana pode ser definida como:

> Material silicoso ou sílico-aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes para formar compostos com propriedades cimentantes. (Metha e Monteiro, 1998).

São bastante significativos os efeitos benéficos causados pelas reações pozolânicas e relatados por vários pesquisadores. Metha e Monteiro (2008) declaram que as adições minerais melhoram a microestrutura do concreto, reduzem a segregação e exsudação devido a segmentação dos canais de percolação da água e promovem o aumento de locais de nucleação para os produtos de hidratação, tornando assim, a pasta mais homogênea. Com isso, os grãos menores, por efeito físico, diminuem o efeito parede na zona de transição devido ao empacotamento dos poros promovendo o aumento da resistência.

Segundo Gastaldini (1996), as reações pozolânicas reduzem a porosidade e

a permeabilidade da pasta de acordo com a reatividade destas adições com o CH.

Para Papadakis (2002), a reatividade das adições minerais ocorre devido aos seus constituintes ativos (principalmente a sílica amorfa) que reagem com o CH produzido pelo processo de hidratação do cimento. Investigando as reações da sílica ativa, observou que com o acréscimo do teor de adição em substituição em massa de cimento, apesar de a porosidade aumentar ocorreu o refinamento dos poros. Este fato (refinamento) ocorreu devido à redução das dimensões dos poros existentes, como também, do tamanho dos cristais de hidróxido de cálcio.

Embora comprovada suas vantagens técnicas e econômicas através de várias publicações, a substituição do cimento por adições minerais também provoca alguns efeitos colaterais como a redução da reserva alcalina devido ao consumo de CH pelas reações pozolânicas. Em vista disso, se faz necessário conhecer as características químicas e físicas destas adições (pozolanas) para serem incorporadas na mistura aglomerante, pois conforme Kilinçkale (1997), as pozolanas apresentam propriedades diferentes sob o aspecto da durabilidade do concreto, conforme o seu tipo ou teor.

2.3.1 Ações químicas das adições minerais

As adições minerais podem ser classificadas, segundo Metha e Monteiro (2008), quanto ao tipo de atividade como: pozolânicas (sílica ativa, cinza volante e cinza de casca de arroz), cimentantes (escória de alto forno) e inertes (filer calcário), e que seu grau de atividade está relacionado com sua área específica e sua cristalinidade, sendo mais reativa quanto maior for sua área específica e amorfismo.

Segundo Papadakis (2002), a reatividade das adições minerais se dá em função de sua forma vítrea ou cristalina. A primeira, ao se combinar com o CH e formar compostos de C-S-H produz uma estrutura similar às geradas pela hidratação do cimento, e a segunda, devido a sua estrutura cristalina, possui menor reatividade.

A principal reação química decorrente do CH liberado da hidratação do

cimento e as pozolanas é denominada reação pozolânica. Esta reação ocorre, segundo Massazza (1998), devido a aceleração da hidratação do C_3S pelas partículas finas das pozolanas que produzem cátion de sílica (Ca^{2+}) na solução dos poros, que reage com o hidróxido de cálcio para formar o gel secundário de C-S-H conforme equação que segue:

$$\text{Pozolana} + CH + H \rightarrow C - S - H \qquad \text{(Equação 2.12)}$$

A formação dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) secundários de baixa densidade (baixa relação C/S) segundo o mesmo autor, contribui para o refinamento do tamanho dos poros, ou seja, a transformação dos vazios capilares grandes em vazios de pequenos tamanhos. Isto faz com que ocorra a densificação da matriz e, por consequência, o aumento da compacidade do concreto frente a agentes agressivos.

2.3.2 Ações físicas das adições minerais

Segundo Neville (1997), o aumento das reações de hidratação e a redução da porosidade da zona de transição ocorrem em função das adições minerais depositarem-se nos interstícios da pasta, afetando o arranjo físico do sistema, atuando como pontos de nucleação das partículas do cimento e dificultando a orientação preferencial dos cristais de hidróxido de cálcio na interface pasta-agregado. Esta ação física das adições minerais, sobretudo as de elevada finura, é denominada efeito filer, que faz com que os poros e vazios da pasta cimentícia sejam preenchidos pelos grãos mais finos destas adições, aumentando com isso a compacidade e a resistência da pasta devido a uma menor penetrabilidade do concreto a fluidos.

Segundo Metha e Monteiro (1998), além desta ação física, a reação pozolânica (química) também é responsável pelo refinamento dos grãos (como os de CH) e do tamanho dos poros, que faz com que aumente a resistência na zona de transição que é a principal fonte de microfissuras no concreto. A interface

pasta agregado (zona de transição), é “o elo mais fraco da corrente”, sendo considerada a fase de resistência limite do concreto.

Ollivier (1998) relata que o uso da sílica ativa (adições ultrafinas) reduz a porosidade e o gradiente da relação água/cimento na zona de transição em decorrência do efeito “microfíler”. Além disso, a reação pozolânica, responsável pelo refinamento dos grãos como os de CH, aumenta a resistência da pasta de cimento diminuindo a microfissuração, aumentando a permeabilidade do sistema impedindo a penetração de agentes agressivos e, consequentemente, melhorando a durabilidade do material.

Observa-se assim que, as ações físicas das adições minerais trazem benefícios para as propriedades do concreto como: trabalhabilidade, exsudação, densidade, permeabilidade e resistência mecânica, e que estas, contribuem para o aumento da sua durabilidade. A melhora dessas propriedades é tão maior quanto mais elevada é a superfície específica da adição mineral.

2.3.3 A cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz (CCA) é um subproduto agrícola obtida pela queima da casca de arroz a céu aberto (sem controle de temperatura) ou pela combustão controlada ou não em fornos industriais. Esta cinza provém do beneficiamento do próprio grão, que utiliza a casca de arroz como fonte de energia ou pela combustão de processos industriais como em olarias e engenhos. O Brasil destaca-se como o maior produtor ocidental deste cereal, sendo o Rio Grande do Sul o maior produtor do território nacional, com percentuais superiores a 60% nos últimos anos.

Segundo dados do IRGA (2014), a produção nacional 2012/2013 foi de 11.746.000 toneladas de grãos. A produção no Rio Grande do Sul, neste mesmo período foi de 8.069.903 toneladas. Isto geraria somente no Rio Grande do Sul 1.614.000 toneladas de casca de arroz e 323.000 toneladas de CCA (in natura) da safra 2012/2013, tornando-o em função deste volume gerado, um potencial fornecedor deste resíduo para a produção de CCA e com possibilidades de seu emprego em escala industrial como material pozolânico para a indústria do

concreto.

Em vista destes fatos, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas com objetivo de viabilizar o emprego deste resíduo como adição mineral na fabricação de concretos estruturais. Soma-se a isso, o problema ambiental gerado pela deposição deste material, muitas vezes descartados diretamente na natureza, onde, a sua utilização em concretos, configura uma das soluções para minimizar os potenciais riscos de poluição do meio ambiente.

Segundo Dal Molin (2005), a casca de arroz é uma dura capa lenhosa com elevado teor de sílica, composta aproximadamente por 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica anidra. Segundo Souza (1993), quase 80% do peso da casca é composto de carbono e sua cinza é composta basicamente de sílica, portanto, bastante alcalina.

A cinza de casca de arroz é uma pozolana que apresenta boa reatividade com o CH, porém, as alterações que promovem no concreto como, maior resistência mecânica nas idades iniciais e aumento da durabilidade, seja pela adição ou substituição parcial do cimento, dependem de suas características físicas, químicas e processo de combustão da casca (temperatura e tempo de queima).

Embora derive de material orgânico, é considerada mineral devido à sua composição química, uma vez que, obtida de forma adequada, possui segundo estudos de Houston (1972) porcentagens de 90 a 95% de sílica amorfa e elevadas superfícies específicas quando moídas que, segundo Metha e Monteiro (1994), giram em torno de 50000 a 60000 m^2/kg, o que confere a este material alta reatividade pozolânica.

Para Metha e Monteiro (2008), a cinza de casca de arroz resultante da queima a céu aberto ou pela combustão não controlada em fornos industriais, contém grande parte de minerais de sílica não reativos como a critobalita e tridimita, devendo ser moída finamente a fim de desenvolverem atividades pozolânicas. Por outro lado, quando a combustão possui controle de temperatura consegue-se manter a sílica no seu estado amorfo, produzindo uma cinza altamente reativa.

Vários autores (CHOPRA, 1979, JAMES & RAO, 1986, NEVILLE, 1997,

CHAUDHARI, 2002, entre outros) têm como consenso que a reatividade da CCA é fortemente influenciada pela temperatura, pois, em suas pesquisas, as maiores atividades pozolânicas ficaram entre 400ºC e 700ºC, sendo que, a reatividade com o CH diminuía, conforme aumentava temperatura.

Conforme Chopra (1979), a redução da reatividade pozolânica da sílica presente na CCA acontece quando é queimada a temperaturas acima de 700°C podendo apresentar-se sob a forma cristalina. Chaudhari (2002), defende que, temperaturas acima de 500ºC proporcionará a formação de cristais (critobalita e tridimita) diminuindo a pozolanicidade. Além disso, a não remoção de impurezas como o carbono, representa matéria orgânica não queimada no processo de combustão que com isto, diminui a reatividade das CCA e confere cor mais escura ao concreto.

Segundo Rego et al. (2006), a quantidade de material amorfo nas cinzas é o que diferencia a CCA residual sem controle de temperatura da CCA com temperatura de queima controlada. Coloca também que, mesmo as CCA originadas de queima não controlada podem apresentar características pozolânicas satisfatórias.

Outro fator importante que apresenta grande influência na reatividade da cinza é o tempo de moagem ao qual a amostra será exposta. Conforme Metha e Monteiro (1998), o refinamento dos grãos da CCA devido ao processo de moagem faz as partículas ficarem mais finas, aumentando a atividade pozolânica e influenciando significativamente na resistência mecânica do concreto.

Em pesquisa com amostras de CCA residual moídas por um período de 3 e 5 horas, Rego et al. (2002), verificou a importância da finura de moagem nas reações pozolânicas. Observou que, com o aumento do tempo de moagem de 3 para 5 horas, o diâmetro médio das partículas reduziram respectivamente de 19,78µm para 15,19µm. Além disto, comprovou também que, com o maior tempo de moagem, o índice de atividade pozolânica aumentou de 77,7% em 3 horas para 84,5% em 5 horas.

Da mesma forma, autores como Silveira et.al. (1996), Wada et.al. (2000), Bouzoubaâ (2001) e Frizzo (2001), comprovaram em suas pesquisas que, mesmo utilizando controle ou não de temperatura, misturas e tempos diferentes de

moagem, quanto maior a finura da amostra de CCA, maior foi a reatividade destas devido ao aumento de suas áreas específicas.

Prudêncio e Santos (1996), demonstraram que o índice de atividade pozolânica (IAP) da CCA residual aumenta com o tempo de moagem até o limite de 4 horas. Após este tempo há um decréscimo no IAP apesar da superfície específica continuar aumentando. Este comportamento pode ser atribuído as partículas que, muito finas, formam grumos que não reagem na sua totalidade com o $Ca(OH)_2$ liberada no processo de hidratação do cimento.

Pode-se concluir que, a finura exerce forte influência sobre o potencial reativo da CCA, sendo estas mais reativas quanto menor as dimensões das partículas, contudo, há um limite de moagem devido à possível perda de reatividade e dificuldade de dispersão pela formação de grumos.

Autores citados anteriormente e demais pesquisas produzidas pela comunidade científica, atestam para a viabilidade da CCA como adição mineral para concreto estrutural. Porém, nenhuma delas com a utilização da cinza de casca de arroz natural (CCAN), sem moagem e sem controle de temperatura quando a variável de durabilidade é a carbonatação tema da presente dissertação.

Segundo Hoppe (2008), estima-se que a CCA residual beneficiada (moída) quando comparada com a CCA residual natural ou “in natura” (sem moagem), ocorra um decréscimo desta em relação à primeira tanto quanto à resistência mecânica como às propriedades de durabilidade do concreto quando analisadas para os mesmos teores de substituição e relação a/ag. Porém, concluiu em sua pesquisa que existe a possibilidade de obter concretos melhores que o traço de referência utilizando CCA em seu estado físico natural (sem moagem) contrariando os conceitos descritos anteriormente. O autor utilizou como diferencial a ordem de colocação dos materiais na betoneira como processo de moagem da CCA natural, fazendo que, com o tempo de amassamento da mistura diminuíssem as dimensões dos grãos da CCA natural em relação aos da CCA moída.

Verifica-se, portanto, que existe uma lacuna ainda a ser investigada, ocasionada pela falta de estudos laboratoriais e que nesta pesquisa buscou-se responder, através dos resultados obtidos, sobre a possibilidade de emprego da CCA residual natural (sem moagem – CCAN) para concretos estruturais quando

comparada com a CCA residual moída (CCAM) e as misturas de referência onde, a variável de durabilidade investigada foi a carbonatação acelerada.

2.3.4 Carbonatação acelerada em concretos com CCA

A carbonatação acelerada depende de vários fatores como a concentração de CO_2, teor de umidade, temperatura, grau de saturação dos poros, tipo de cimento e teor de adição mineral empregado. Sabe-se que concretos com a incorporação de CCA têm pré-disposição a apresentar coeficientes de carbonatação superiores ao concreto de referência para as mesmas idades e relação a/ag. Este comportamento está associado ao conceito da reserva alcalina disponível na matriz cimentícia que, Segundo Matsutato et al (1992), o avanço da carbonatação é proporcional a alcalinidade total na matriz da pasta do cimento que é mais lenta em concretos de cimento Portland comum devido a maior concentração de hidróxidos alcalinos na solução dos poros do que com adições minerais. Com isso, a difusão do CO_2 torna-se mais lenta pois, para continuar avançando e consumindo o CH presente em maior quantidade na solução, antes precisa rebaixar o pH do concreto para então prosseguir penetrando e precipitando o CH.

Hoppe (2008), pesquisou a carbonatação acelerada (teor de 5% de CO_2 e U.R=75%) para concretos com a adição de CCA residual (natural e moída) de 15% e 25% em substituição ao cimento CPII F-32 (valores em massa) moído em moinho de bolas (M) e “in natura” (N), sendo esta sem moagem. As misturas foram comparadas com o concreto de referência e com três relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65. A conclusão foi que para as amostras contendo CCA “in natura” os coeficientes de carbonatação apresentaram valores superiores em comparação às amostras contendo CCA moída (Figura 2.6) e que a influência das adições minerais no que se refere à porosidade não provocam acentuada melhora sobre esse parâmetro.

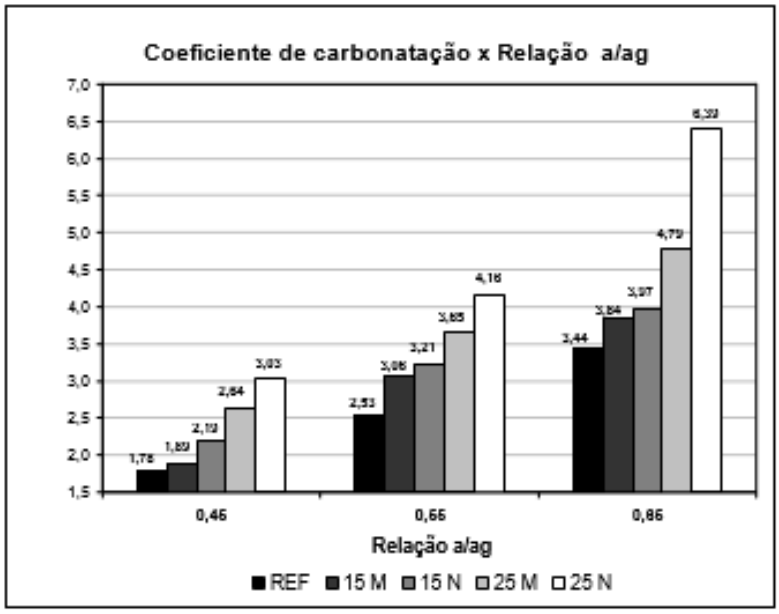


Figura 2.6 – Coeficiente de carbonatação X relação a/ag (HOPPE, 2008).

Venquiaruto (2002), pesquisou a carbonatação acelerada em concretos com teores de substituição de 25% e 50% de cimento por CCA nas relações a/ag de 0,35, 0,50 e 0,65 e duas finuras das amostras 23,0m²/g (finura 1) e 36,3m²/g (finura 2). A autora observou que todas as misturas com CCA apresentaram coeficientes de carbonatação superiores ao concreto de referência para as relações a/ag de 0,50 e 0,65. Para a relação 0,35 carbonataram somente duas misturas com teores de 50% de CCA com suas respectivas finuras que foram as misturas 1CA50 (finura 1) e 2CA50 (finura 2). Para a relação 0,50 as misturas 1CA50 e 2CA50 apresentaram coeficientes de carbonatação de 106% e 48% superiores as 1CA25 (finura1) e 2CA25 (finura2), respectivamente. O mesmo ocorreu para a relação 0,65, onde o aumento dos coeficientes de carbonatação das misturas 1CA50 e 2CA50 foram superiores em 120% e 19%, respectivamente, em relação as 1CA25 e 2CA25. O aumento dos teores de substituição de 25% para 50% contribuiu para o aumento dos coeficientes de carbonatação.

Para analisar os comportamento da carbonatação e a influência das adições minerais no concreto, Vaguetti (2005), fixou a resistência mecânica em 40MPa e utilizou as seguintes misturas 25% de CV (VB), 50% de CV (VA), 25% de CCA (A), 70% de E (E) e a mistura de referência (TR). A comparação entre os teores de 25%

de incorporação de (VB) e (A) mostrou que o coeficiente de carbonatação da mistura (VB) foi superior ao de (A) sendo os valores respectivamente de 8,62mm/semana^{0,5} e 4,57mm/semana^{0,5}. O autor credita esse comportamento ao fato da maior reatividade pozolânica da CCA em relação a CV e também ao maior refinamento dos poros da primeira.

2.3.5 Teor de hidróxido de cálcio em concretos com CCA

Sabe-se que a substituição do teor de cimento Portland por CCA no concreto promove a densificação da pasta através do refinamento dos poros e tortuosidade dos capilares, diminuindo assim, a permeabilidade e conferindo-lhe maior durabilidade ao ataque de agentes agressivos. Por outro lado, traz como consequência, a redução do CH que, ao ser consumido pelas reações pozolânicas devido a presença da sílica na composição química da CCA, resulta no aumento da taxa de carbonatação.

Segundo Kazmierczak (1995), as reações pozolânicas consomem os álcalis livres resultantes da hidratação do clínquer, reduzindo a alcalinidade da pasta. Com menores teores de álcalis, a frente de carbonatação, devido as reações com o CO_2 dissolvido na fase aquosa dos capilares, será maior.

Em análise do teor de hidróxido de cálcio remanescente, Isaia, Gastaldini e Moraes (2000), estudaram a substituição de cimento Portland por 12,5%, 25% e 50% de CCA para as relações a/ag de 0,35, 0,55 e 0,65 e verificaram que quanto maior o teor de CCA incorporado ao concreto, menor foi a reserva alcalina apresentada pelo mesmo para conter o avanço da carbonatação. Os resultados mostram que para os teores de adição de CCA de 12,5% e 25% houve decréscimos médios dos teores de hidróxido de cálcio respectivamente de 34% e 61% ao concreto de referência. Para o teor de substituição de 50% de CCA, o hidróxido de cálcio foi consumido quase em sua totalidade (98%) para as três relações a/ag estudadas, verificando-se que a reserva alcalina diminuiu significativamente devido a atividade pozolânica da CCA.

Deve-se considerar que não é somente o CH que é consumido nas reações de carbonatação e, sim, todos os compostos alcalinos que contenham cálcio (silicatos de cálcio hidratados, aluminatos e ferratos de cálcio, hidróxidos, etc.), se houver condições favoráveis para o desenvolvimento da carbonatação acelerada (tipo e quantidade de cimento, teor de CO_2, umidade relativa, etc.). Em geral, o consumo de CH e demais álcalis pelas reações de carbonatação acelerada é maior do que nos ensaios naturais.

2.3.6 Resistência mecânica em concretos com CCA

O emprego de CCA em substituição parcial do cimento Portland acarreta vários benefícios ao concreto, principalmente o aumento da resistência à compressão desenvolvida nas primeiras idades, dependendo do tipo e teor desta pozolana na mistura. Segundo Tashima (2004), a adição de CCA provoca um incremento na resistência à compressão devido à capacidade da pozolana de fixar o hidróxido de cálcio, gerado durante as reações de hidratação do cimento.

Alguns destes benefícios, são obtidos através do efeito microfiler (efeito físico) que, devido ao tamanho de suas partículas, ocupam os espaços disponíveis entre os grãos do cimento alojando-se nos interstícios da pasta, atuando como pontos de nucleação e assim dificultando a formação de cristais de CH. Outros benefícios, das reações pozolânicas (efeito químico) que, modifica a microestrutura da pasta devido à combinação da sílica presente na CCA e o CH proveniente do processo de hidratação do cimento Portland, tornando-a mais homogênea e resistente.

Segundo Rodriguez de Sensale e Dalmolin (1998), o aumento da resistência do concreto inicia no primeiro dia; para a sílica ativa no terceiro dia; e para cinza volante no 17° dia, aproximadamente. Em pesquisa realizada pelas autoras, onde utilizaram teores de substituição de 10 e 20% de cimento por CCA, concluíram que para as idades de 28 e 91 dias a diferença de resistência dos concretos contendo CCA e o de referência (100% de cimento Portland) não foi significativa.

Sensale (2006) também pesquisou concretos com a incorporação de CCA de diferentes origens, sendo uma do Uruguai (residual) e outra dos EUA (com controle de temperatura e tempo de combustão da casca). A autora investigou a resistência mecânica aos 91 dias em concretos com teores de substituição de 10 e 20% de cimento por CCA e três relações a/ag 0,32, 0,40 e 0,50. Os ensaios de difração de raio-x demonstraram que a CCA norte-americana poderia ser considerada amorfa (98,5% de sílica amorfa) enquanto a uruguaia apresentava materiais cristalinos em sua composição (cristobalita) e somente 38% de sílica amorfa. Os resultados mostraram que para a menor relação a/ag (0,32) e com 10% de substituição, tanto a CCA uruguaia como a norte-americana apresentaram praticamente os mesmos valores, porém, para o teor de 20% de substituição, a CCA norte-americana foi 10% superior em relação a uruguaia. Já para a maior relação a/ag (0,50), os teores de 10% e 20% de substituição apresentaram, respectivamente, valores de 25% e 40% maiores da CCA norte-americana em relação a CCA uruguaia. Como conclusão verifica-se os dois efeitos anteriormente citados (físico e químico), predispõem níveis de resistências à compressão mais altos devido ao efeito microfiler (físico) devido as finas partículas de CCA uruguaia. Para a CCA norte-americana, devido ao maior teor de sílica ativa (98,5%) na sua composição torna o efeito pozolânico (químico) mais pronunciado no desenvolvimento da taxa de resistência mecânica dos concretos analisados.

Duart (2008) verificou que, enquanto a resistência do traço referência aos 91 dias cresceu pouco quando comparado aos 28 dias, os traços com cinza de casca de arroz moída (CCAM) apresentaram o crescimento superior a 20% dos 28 para 91 dias, para todas as relações a/ag estudadas. Este fato pode ser explicado pelo maior desenvolvimento das reações pozolânicas, que devido ao alto teor de sílica das partículas de CCA, reagiram com o CH produzido pelas reações de hidratação do cimento e também pela finura da CCAM, que potencializou tais reações, além de possibilitar maior nucleação de cristais. Os traços com cinza de casca de arroz natural (CCAN) com 15% tiveram uma recuperação de resistência aos 91 dias e superaram o traço de referência em todas as relações a/ag e também apresentaram valores bem próximos aos traços com CCAM. Tal comportamento foi atribuído à reação pozolânica.

Segundo Cezar (2011), nas misturas ternárias, compostas com cinza volante (CV) e cinza de casca de arroz moída(CCAM), observou-se crescimento médio da resistência à compressão dos 7 para os 28 dias de 75% contra 101% das misturas com cinza volante (CV) e cinza de casca de arroz natural (CCAN). Aos 182 dias, a mistura 15 CCAM superou a mistura de REF. A mistura CCAN apresentou resistências à compressão inferiores às misturas CCAM e REF, em todas as idades estudadas. Porém, aos 182 dias, as resistências de CCAN e REF aproximaram-se.

Pedrozo (2008), afirma que é viável tecnicamente a utilização da CCA residual, moída (nos teores de 15 e 25%) e natural (no teor de 15%) para o emprego em concretos estruturais. Meira (2009), compartilha da mesma ideia, onde, os resultados obtidos no emprego de CCA natural, sem moagem, com baixos teores (15% de substituição) adquiriram resistências axiais superiores ao referência.

A constatação desta viabilidade, segundo Pedroso (2008), representa uma alternativa sustentável para o aproveitamento de um resíduo que até agora vem sendo descartado de forma prejudicial ao meio ambiente. Além disso, a CCA natural, sem beneficiamento, representa um avanço significativo para o setor produtivo, possibilitando que se agregue mais valor aos concretos produzidos na medida em que há um menor consumo de energia.

Salienta-se que os resultados citados nos parágrafos anteriores de concretos com cinza de casca de arroz natural pertencem a dissertações relacionadas ao mesmo projeto da presente pesquisa, com os mesmos materiais, exceto o cimento (CPII-F).

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve as técnicas, procedimentos e materiais utilizados durante o desenvolvimento desta pesquisa que tem por objetivo investigar a durabilidade do concreto com adição de CCAN frente à carbonatação acelerada, com dois tipos de cimento. Para tal, procurou-se seguir uma metodologia que possibilitasse cientificamente a repetição desta e, posteriormente, a comparação com outras pesquisas já publicadas, como também, fornecer subsídios para futuras pesquisas relacionadas sobre o tema.

A parte experimental teve como objetivo analisar o comportamento das misturas com substituição parcial dos cimentos CPII-Z e CPIV por CCA nas formas NATURAL e MOÍDA em relação a uma de REFERÊNCIA com três relações a/g para cada mistura frente à carbonatação acelerada. Os resultados das profundidades e dos coeficientes de carbonatação foram obtidos através de ensaios realizados no LMCC/UFSM, sendo que os teores de hidróxido de cálcio remanescente foram realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

3.2. VARIÁVEIS INVESTIGADAS

As variáveis estudadas nesta investigação são:

3.2.1 Variáveis Independentes: nesta pesquisa os parâmetros classificados nesta categoria são:

• relações a/ag 0,45; 0,55 e 0,65 em todos os traços com e sem adição de CCA residual natural e moída para os ensaios de carbonatação acelerada e teor de hidróxido de cálcio remanescente.

• tipos e teores de materiais cimentícios: foram utilizados os cimentos tipos CPII-Z e o CP-IV com as seguintes misturas aglomerantes para ambos: REFERÊNCIA, 15% de CCAN (cinza de casca de arroz natural) e 15% de CCAM (cinza de casca de arroz moída).

• idade dos ensaios: para a carbonatação acelerada e teor de hidróxido de cálcio remanescente 4, 8, 12, e 16 semanas de exposição ao CO_2 em câmara climatizada.

• cinza de casca de arroz (CCA) – CCAN (natural) e CCAM (moída) com teor de substituição em massa de 15% para os cimentos CPII-Z e CP-IV respectivamente. O teor de 25% foi abandonado tendo em vista os baixos resultados apresentados para propriedades-chaves, nas etapas anteriores.

3.2.2 Variáveis Dependentes:

- profundidade da carbonatação acelerada
- coeficiente de carbonatação acelerada
- teor de hidróxido de cálcio remanescente
- resistência à compressão axial

3.3 MATERIAIS EMPREGADOS

Foram utilizados os agregados locais e os aglomerantes disponíveis na região, com os quais foram realizados os ensaios de caracterização.

3.3.1 Cimentos e cinza de casca de arroz

Conforme a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) os cimentos utilizados possuem as seguintes características: CPII-Z (ABNT NBR 11578:1991), cimento composto com 6 a 14% de material pozolânico e até 10% de material carbonático; CP-IV (ABNT NBR 5736: 1999), cimento pozolânico com teor entre 15 e 50% de cinza volante. Estes cimentos foram

escolhidos nesta fase IV da pesquisa em substituição ao cimento CPIIF empregado na Fase II porque apresentam pozolanas em sua substituição e, logo, com propriedades de mitigar as reações álcali-sílica detectadas naquela fase do projeto com a CCAN.

A CCA utilizada nos traços com adição mineral foi escolhida entre diversas amostras de indústrias de arroz da região de Santa Maria, RS (Induber Berleze, Induber Trevo, Marzari, Coocal e Cauduro), sendo que a que apresentou melhor desempenho foi a da Induber Berleze. Ela é produzida por queima em fornos sem controle de temperatura para a geração de energia. A cinza foi aplicada de duas formas: sem moagem e moída. O processo de moagem foi realizado em moinho de bolas metálicas durante 60 minutos. Em pesquisas anteriores, verificou-se que um tempo de moagem maior aumentou a pozolanicidade, porém essa melhoria não compensava o gasto energético que esse processo demandava.

Essas CCAs foram as mesmas empregadas nas fases anteriores deste projeto. Abaixo, os ensaios realizados na caracterização dos aglomerantes e a tabela 3, com a caracterização física dos cimentos, cinza volante e CCA:

- NM 23:2001 Cimento Portland – Determinação da massa específica:

- NM 76:1998 Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine);

- ABNT NBR 14656:2001 - Cimento Portland e matérias-primas – Análise química por espectometria de raios X;

- NM 22:2012 - Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos – Análise química – Método de arbitragem.

O quadro 1 apresenta as características físicas dos cimentos e cinza de casca de arroz desta pesquisa.

Quadro 1 – Caracterização física dos cimentos e CCA.

Características Físicas	CPIIZ	CPIV	CCA natural	CCA moída
Massa específica (g/cm^3)	2,96	2,68	1,96	2,09
Área específica (cm^2/g)	5240	4940	4441	4501
Dimensão média (µm)	7,70	8,18	33,19	15,54
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas (µm)	0,97	1,06	5,19	2,38
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas (µm)	27,52	25,59	80,51	54,14
Expansibilidade em autoclave (%)	-	-	-	-

Sendo: (-) não determinado.

A automoagem da CCA natural utilizada no ensaio em argamassa foi obtida no laboratório através de um processo de simulação do traço utilizado em concreto. Nessa simulação, a quantidade de CCA adicionada na betoneira equivale aos 15% de substituição ao cimento. A sequência do processo foi:

- 1º - as britas 0 e 1 foram colocadas, 50% de cada, junto com a CCAN na betoneira, com intermoagem por 5 min;

- 2º - as areias fina e média, 50% de cada, previamente peneiradas em uma malha de 0,149 mm (Tyler 100), foram adicionadas à CCAN e às britas na betoneira, por mais 10 min;
- 3º - após o término do tempo total de 15 min, esses materiais foram retirados da betoneira. Eles foram peneirados para se obter somente a CCAN passante na malha de 0,074 mm (Tyler 200). A Figura 3.1 apresenta as micrografias das dimensões dos grãos obtidas pelos processos acima descritos.

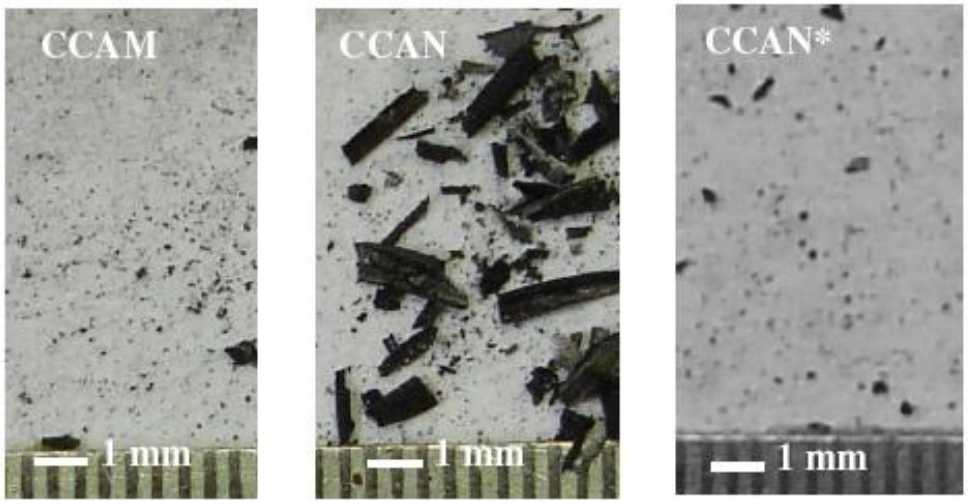


Figura 3.1 - Microfotografias por microscopia óptica da cinza de casca de arroz moída (CCAM), da cinza de casca de arroz natural como recebida (CCAN) e cinza de casca de arroz natural após a moagem na betoneira (CCAN*)
Fonte: Zerbino, Giaccio e Isaia (2011)

A seguir, no quadro 2, a análise química dos cimentos e CCA.

Quadro 2 – Análise química dos cimentos e CCA.

Composição Química	CPIIZ	CPIV	CCA natural	CCA moída
CaO	50,84	34,18	1,25	1,32
SiO_2	21,92	35,37	95,04	94,84
Al_2O_3	6,33	10,17	0,00	0,39
Fe_2O_3	3,27	5,17	0,44	0,54
SO_3	2,53	2,04	0,01	0,01
MgO	5,70	4,30	0,45	0,40
K_2O	1,17	1,67	1,40	1,45
TiO_2	0,26	0,51	-	-
Na_2O	0,16	0,16	0,09	0,11
SrO	0,10	0,06	-	-
P_2O_5	0,09	0,10	-	-
MnO	0,10	0,14	-	-
PF	5,46	4,45	-	-
Total	97,93	98,32	-	-
Resíduo insolúvel	10,42	41,80	-	-
CaO livre	2,00	1,43	-	-

As figuras 3.2 e 3.3 apresentam os difratogramas das CCAs natural e moída, com alguns picos

cristalinos de quartzo (Q) e cristobalita (C) em destaque, resultado de uma queima não controlada da casca de arroz. Acredita-se que o maior pico de quartzo no ângulo 26,642° presente no difratograma da CCA natural se deva à contaminação no processo de pré-moagem com agregados.

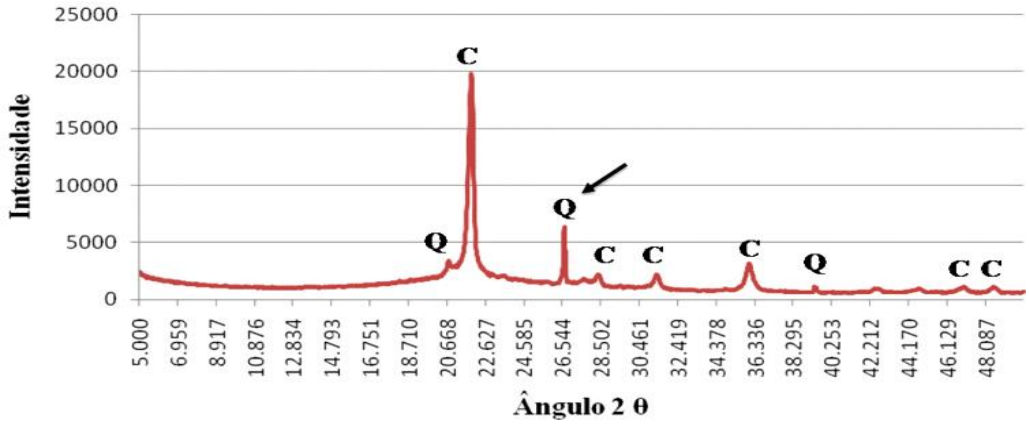


Figura 3.2 – DR-X da CCA natural.

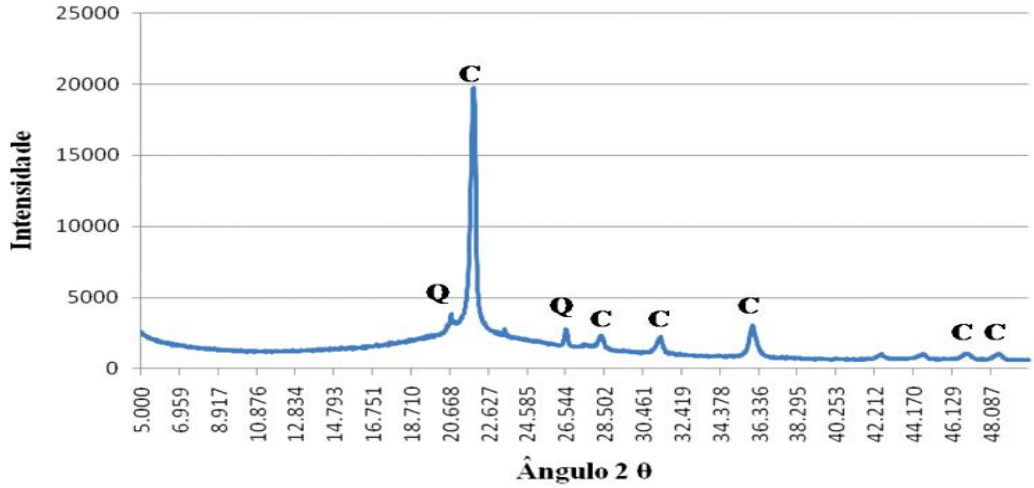


Figura 3.3 – DR-X da CCA moída.

A caracterização da CCA natural e moída que determinou seus índices de atividade pozolânica (IAP) foi feita através do método proposto por Isaia (1995), a partir do ensaio proposto pela ABNT NBR 5753:2010 (Ensaio Fratini). As convenções adotadas para o ensaio de pozolanicidade estão representadas no quadro 3.

Quadro 3 – Convenções do ensaio de pozolanicidade.

Misturas	Composição
REFERÊNCIA	100% Cimento Portland
CCAN 15	85% Cimento Portland + 15% CCA natural
CCAM 15	85% Cimento Portland + 15% CCA moída

Através do gráfico do ensaio Fratini, mediu-se a distância "d", reta que une a origem dos eixos até o ponto em questão; a partir desta, calculou-se o IAP em porcentagem no quadro 4.

Quadro 4 – Índice de atividade pozolânica.

Misturas	Atividade Pozolânica		Distância	
	mmol CaO/l	mmolOH^-/l	("d"cm)	IAP[1]
REFERÊNCIA	8	59	6,8	14,7
CCAN 15	9	48	6,0	16,7
CCAM 15	6	43	5,2	19,2

1 - Obtenção do índice (IAP=(1/d) x 100) conforme Isaia (1995).

Os resultados mostram, como esperado, menor índice de pozolanicidade para o cimento, seguido da CCAN15 e, por fim, o maior de todos para a CCAM15, tendo em vista que esta última consumiu maior quantidade de CaO e diminuiu o pH (menor OH).

3.3.2 Agregados

Foram utilizados dois tipos de areia natural de origem quartzosa, respectivamente areia grossa e fina, proveniente do município de Santa Maria, RS. Os agregados foram lavados, secos em estufa, peneirados na peneira 4,75mm tomando-se a fração passante e armazenados em baias protegidas com tampas até o início das moldagens. Também foram utilizados dois tipos de pedras britadas originadas de rocha diabásica - brita 0 (9,5mm) e 1 (1,9mm) - provenientes do município de Itaara, RS. Os agregados foram lavados, secos em

temperatura ambiente e armazenados em baias protegias com tampas até início das moldagens.

Os ensaios realizados na caracterização dos agregados foram os seguintes:

- ABNT NBR 7211/2009: Agregado para concreto – Especificação;
- NM 52/2009: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa aparente;
- NM 53/2009: Agregado graúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente;
- NM 45/2006: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

Visando obter uma granulometria mais fechada (compacta), foi adotado para os agregados as seguintes composições a partir de ensaios repetitivos de massa unitária compactada:

- Agregados Miúdos – 50% de areia grossa + 50% de areia fina
- Agregados Graúdos – 50% de brita 0 (9,5mm) + 50% de brita 1 (19mm)

As características físicas dos agregados estão apresentadas no quadro 5, e as curvas granulométricas nas figuras 3.4 e 3.5.

Quadro 5 - Características dos agregados utilizados.

Agregados	Módulo de finura	Massa específica (g/cm³)	Massa unitária solta (g/cm³)	Massa unitária compactada (g/cm³)
Areia fina A	**1,97**	**2,64**	**1,62**	**1,73**
Areia grossa B	**2,80**	**2,63**	**1,68**	**1,77**
Areia 50% de cada	**2,39**	**2,64**	**1,65**	**1,78**
Brita 0	**5,85**	**2,52**	**1,39**	**1,43**
Brita 1	**6,90**	**2,54**	**1,40**	**1,48**
Brita 50% de cada	**6,38**	**2,53**	**1,45**	**1,52**

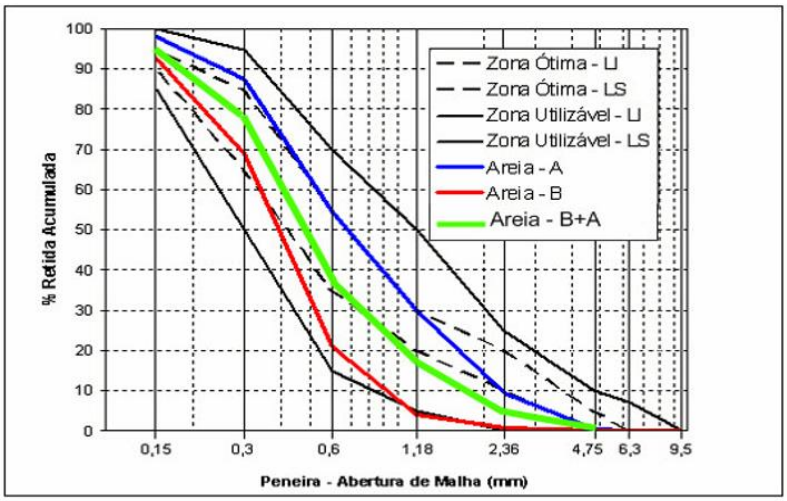


Figura 3.4 – Curva granulométrica dos agregados miúdos.

Observa-se pelo gráfico da figura 3.4 que, com a mistura de 50% de cada areia, obteve-se uma distribuição granulométrica bastante próxima da zona aceitável inferior na faixa granulométria 4,75/0,6 mm e da zona aceitável superior na faixa 0,6/0,15 mm.

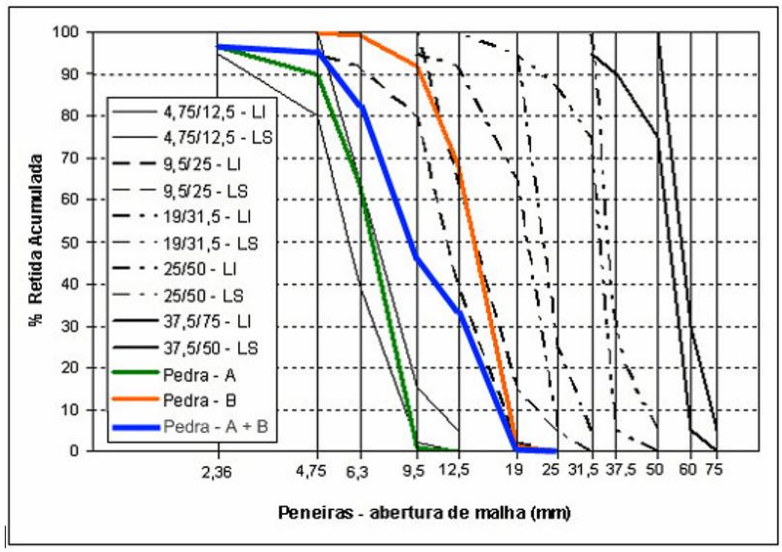


Figura 3.5 – Curva granulométrica dos agregados graúdos.

Com a mistura em partes iguais do agregado graúdo, obteve-se um material com granulometria intermediária às utilizadas, ficando aproximadamente em uma zona granulométrica 4,75/25, entre o limite inferior (LI) e o limite superior (LS).

3.3.3 Aditivo

Para alcançar a consistência e trabalhabilidade das misturas avaliadas pelo abatimento no cone de Abrams de (80±20) mm, foi necessária a utilização de aditivo superplastificante de alto desempenho à base de polímeros policarboxilatos, isento de cloretos conforme especifica a ABNT 11768:2011.

3.3.4 Água

A água utilizada para as moldagens foi proveniente da rede de abastecimento da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

3.4 TRAÇO DO CONCRETO – DOSAGEM

Foram utilizados quatro tipos de aglomerantes: cimento Portland CPII-Z, cimento Portland CP-IV, cimento com cinza sem moagem (CCAN) e cimento cinza moída (CCAM). Com isso obtiveram-se seis misturas aglomerantes para cada relação a/ag: dois traços de referência com 100% de cimento Portland, dois com CCAN em teores de substituição de 15% e outros dois com CCAM em teor de substituição de 15%. Três relações a/ag foram utilizadas para cada uma das misturas estudadas: 0,45; 0,55; e 0,65, com proporções aglomerante/agregado (1:m) de 1:4,38; 1:5,87; e 1:7,38, respectivamente.

Nos traços com adição de CCA, foram realizadas correções nas quantidades do agregado miúdo, porque apresentam menor massa específica que o cimento utilizado e também porque a CCAM e a CCAN têm massas específicas diferentes. Com isso, foi possível manter constante o percentual de 50% de argamassa seca para todos os traços. O proporcionamento dos concretos foi realizado segundo procedimento proposto por Helene e Terzian (1992), e as quantidades de materiais por m³ de concreto são apresentadas nos quadros 6 e 7.

Quadro 6 – Materiais por m³ de concreto para o cimento CPII-Z (Kg/m³).

Misturas	a/ag	Cimento (CPII-Z)	CCA natural	CCA moída	Areia	Brita	Água	Adit.
Referência	0,45	407	-	-	735	1014	183	0,49
	0,55	332	-	-	807	1009	183	0,90
	0,65	280	-	-	855	1006	183	1,01
15% CCA natural	0,45	346	61	-	681	1014	181	6,63
	0,55	282	50	-	762	1009	181	5,51
	0,65	238	42	-	819	1006	181	4,71
15% CCA moída	0,45	346	-	61	712	1014	183	1,14
	0,55	282	-	50	787	1009	183	0,90
	0,65	238	-	42	840	1006	183	1,01

Quadro 7 – Materiais por m³ de concreto para o cimento CPIV (kg/m³).

Misturas	a/ag	Cimento (CPIV)	CCA natural	CCA moída	Areia	Brita	Água	Adit.
Referência	0,45	401	-	-	725	999	181	1,00
	0,55	328	-	-	797	998	181	0,65
	0,65	280	-	-	855	1006	182	0,28
15% CCA natural	0,45	341	60	-	702	999	181	2,01
	0,55	279	49	-	745	998	181	1,64
	0,65	238	42	-	841	1006	182	0,70
15% CCA moída	0,45	341	-	60	706	999	181	2,01
	0,55	279	-	49	784	998	181	0,39
	0,65	238	-	42	844	1006	182	0,28

3.5 ORDEM DE COLOCAÇÃO DOS MATERIAIS NA BETONEIRA

Foi realizado um estudo experimental desenvolvido anteriormente por Pedrozo (2008), Hoppe (2008), Meira (2009) e Cezar (2011) para determinar a melhor ordem de colocação dos materiais, assim como o tempo de mistura ideal para se atingir a trabalhabilidade desejada, com o menor consumo de superplastificante.

Os melhores resultados foram aplicados nos traços definitivos e estão apresentados no quadro 8, iguais ao procedimento adotado na fase II deste projeto, conforme descrito nas dissertações citadas.

Quadro 8 – Ordem de colocação e tempo de mistura dos materiais na betoneira.

Traço	Ordem / Tempo	Materiais						Tempo de mistura
		Cimento	CCA	Brita	Areia	Agua	Aditivo	
R	Ordem	2º	-	1º	4º	1º	3º	
	Tempo	2min	-	2min	4min	2min	2min	10min
M15	Ordem	2º	2º	1º	4º	1º	3º	
	Tempo	2min	2min	2min	4min	2min	2min	10min
N15	Ordem	3º	1º	1º	4º	2º	2º	
	Tempo	2min	2min	2min	9min	2min	2min	15min

3.6 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Utilizou-se a equação 1, proposta por Mehta e Monteiro (1994) e Neville (1997), para equalizar as variações de temperatura do concreto durante as moldagens, visto que se sucederam em épocas com variações térmicas distintas. A correção foi feita através da temperatura da água em função da temperatura ambiente e dos materiais. Para isso, aqueceu-se ou resfriou-se a água de amassamento com o objetivo de manter a temperatura do concreto aproximadamente em 19 ± 2°C (ver Figura 3.6) conforme equação 3.13:

$$T = \frac{0{,}22.(Tm.Mm + Tc.Mc) + Ta.Ma}{0{,}22.(Mm + Mc) + Ma} \qquad \text{(Equação 3.13)}$$

onde:

T – Temperatura da massa de concreto (ºF)
Tm – Temperatura dos agregados (°F)
Tc – Temperatura do cimento (°F)
Ta – Temperatura da água (ºF)

Mm – Massa dos agregados (kg)
Mc – Massa de cimento (kg)
Ma – Massa de água (kg)

Figura 3.6 – Controle de temperatura do concreto.

A consistência do concreto para cada mistura foi mantida entre 80±2mm para o abatimento do tronco de cone (NM 67:1998) em função dos ensaios de trabalhabilidade anteriormente verificados para cada traço (Figura 3.7). O aditivo foi adicionado em todas as misturas com o objetivo de não só atingir o abatimento especificado, mas também, de torná-las mais homogêneas devido a influência que causa na hidratação da pasta e consequentemente na sua microestrutura.

Figura 3.7 – Abatimento de tronco de cone do concreto.

A moldagem foi executada em duas camadas conforme preconiza a ABNT NBR 5738:2003, sendo utilizada para tal uma mesa vibratória onde o tempo de adensamento foi de 30 segundos para cada camada. Antes da moldagem as fôrmas foram untadas com óleo desmoldante para facilitar a desforma (Figura 3.8).

Figura 3.8 – Adensamento dos corpos de prova em mesa vibratória.

Após 24h de cura os corpos de prova foram desmoldados (Figura 3.9), identificados e levados para a câmara úmida (U.R ≥ 95%) onde permaneceram por um período de cura de 7 dias conforme mostra a figura 3.10.

Figura 3.9 – Desmoldagem das misturas após 24 horas.

Figura 3.10 – Corpos de prova em cura na câmara úmida a 95% de U.R.

Após este período foram transferidos para uma sala climatizada a (23±2)°C de temperatura e de (75±2)% de umidade relativa para período de sazonamento até o início do pré-condicionamento.

3.7 ENSAIOS REALIZADOS

Na sequência, serão descritas as metodologias dos ensaios que foram realizados nas datas determinadas. Os ensaios são: resistência à compressão axial, carbonatação acelerada e teor de hidróxido de cálcio remanescente.

3.7.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados de acordo com a ABNT NBR 5739:2007. Foram moldados três corpos de prova por idade, cilíndricos de 10x20cm, capeados com enxofre e ensaiados em prensa hidráulica (Figura 3.11) nas idades de 28 e 91 dias.

Figura 3.11 – Prensa hidráulica para ensaio de compressão axial.

Os resultados apresentados representam a média aritmética de três determinações de cada traço, com desvio relativo máximo de 10%. Quando esse desvio era maior, foram utilizadas as médias de dois valores.

3.7.2 Ensaio de Carbonatação Acelerada

O ensaio de carbonatação acelerada teve por objetivo obter as profundidades e os coeficientes de carbonatação das misturas apresentadas nos quadros 6 e 7. Estas foram inseridas na câmara climática automatizada Caron por um período de 4, 8, 12 e 16 semanas com as seguintes especificações: umidade relativa (UR) 65%, temperatura 23°C e teor de CO_2 3%, em volume. Foram moldados 6 corpos-de-prova cilíndricos de 10cmx20cm para cada mistura. Destes, 4 foram utilizados para o ensaio de carbonatação acelerada (um por idade), 1 para o pré-condicionamento e 1 para imprevisto (de corte ou ensaio).

Considerando-se o tipo de cimento (CPII-Z e CP-IV), suas relações a/ag (0,45, 0,55 e 0,65) e o tempo de permanência na câmara de carbonatação (4, 8, 12 e 16 semanas) foram moldados para esta pesquisa 108 corpos-de-prova. Todos os corpos-de-prova moldados originalmente de 10cmx20cm foram cortados ao meio, obtendo-se assim dois corpos-de-prova de 10cmx10cm que foram pré-condicionados conforme preconiza a Recomendação

RILEM TC 116-PCD (1999). Esta tem por objetivo dotá-los de uma concentração de umidade em equilíbrio de (75±2)%, temperatura de (23±2)°C com uma distribuição uniforme de água evaporável para que então possam ser armazenados na câmara climática. Para este ensaio, dois corpos-de-prova 10x10cm (obtidos através do corte) foram utilizados para o pré-condicionamento de cada mistura.

Conforme recomendado, três fases são necessárias para o pré-condicionamento:

3.7.2.1. Determinação dos parâmetros da pré-secagem: (Δm)

Para a determinação dos parâmetros da pré-secagem de cada mistura, o primeiro corpo-de-prova (10x10cm) foi pesado e mantido em estufa a 105°C até que seu peso mantivesse 0,5g de variação entre duas leituras consecutivas com intervalo de 24horas, determinando-se assim o total de água evaporável (We), obtido pela equação 3.14:

$$\mathbf{We=mo-md/md} \qquad \text{(Equação 3.14)}$$

Do segundo corpo-de-prova (10cm x 10cm) foram moídas 650g de concreto passante na peneira 6,3mm e retido na peneira 2,4mm (Figura 3.12) que posteriormente foi colocado em uma bandeja metálica e levado para a câmara de carbonatação, utilizando-se desta, apenas a umidade relativa (75%) e a temperatura(23°C) até que seu peso mantivesse 0,1g de variação entre duas leituras consecutivas com intervalo de 24 horas. Após atingida esta variação, a mistura foi levada para uma estufa a 105°C onde se repetiu o processo até que seu peso mantivesse 0,1g de variação entre duas leituras consecutivas com intervalo de 24 horas, determinando-se a concentração da umidade em equilíbrio a 75% de umidade relativa ao ar (We75), obtido pela equação 3.15:

$$\mathbf{We75=me75-md75/md75} \qquad \text{(Equação 3.15)}$$

Figura 3.12 – Corpo de prova e moagem para
determinação dos parâmetros da pré-secagem de cada mistura.

A determinação do Δm corresponde ao peso que a amostra deverá perder para atingir a umidade relativa de 75% é obtida pela equação 3.16:

$$\Delta m = [(We - We75) / (1+We)] \times mo \qquad \text{(Equação 3.16)}$$

Onde a diferença máxima admitida do Δm é de 5% do peso calculado, obtida pela equação 3.17:

$$\Delta m\ (observado) - \Delta m(calculado) / \Delta m(calculado) < 0{,}05 \qquad \text{(Equação 3.17)}$$

A perda de peso necessária para todos os corpos-de-prova foi obtida através de uma regra de três, utilizando-se o Δm obtido de cada mistura como referência para as misturas correspondentes.

3.7.2.2. Pré-secagem:

Para a pré-secagem todos os corpos-de-prova foram anteriormente, pesados, identificados e selados com três demãos de um verniz poliuretânico na face lateral e inferior,

deixando exposta apenas a face superior para que o fluxo de CO_2 penetrasse no sentido axial de todas as misturas. Posteriormente foram colocados em uma estufa com temperatura de 50°C (Figura 3.13) e pesados até atingirem as respectivas perdas de pesos determinados pelo Δm de cada mistura da etapa anterior.

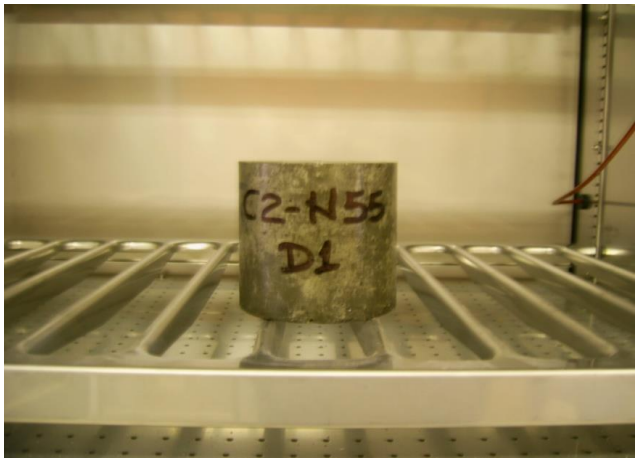


Figura 3.13 - Corpo-de-prova na estufa para pré-secagem.

3.7.2.3. Redistribuição da umidade:

Para esta etapa, os corpos-de-prova depois de adquirirem os pesos necessários foram envoltos em uma camada de filme de polietileno (PVC) conforme a figura 3.14.

Figura 3.14 – Corpo de prova envolto em filme de PVC.

Sobre este filme foram colocados dois sacos de polipropileno (Figura 3.15) e mais um saco de polietileno e alumínio (Figura 3.16) ambos selados a quente, com o objetivo de impedir a perda de massa dos corpos-de-prova por evaporação durante esta etapa.

Figura 3.15 – Corpo de prova embalado em saco de polipropileno.

Figura 3.16 – Corpo de prova embalado em saco de polietileno e alumínio.

Após a última selagem os mesmos foram identificados e colocados em uma estufa com temperatura de 50°C por um período mínimo de quatorze (14) dias conforme mostra a figura 3.17, tendo como objetivo a distribuição homogênea da umidade por todo o corpo de prova de cada mistura.

Figura 3.17 – Corpo de prova na estufa a 50ºC.

Os corpos de prova permaneceram na estufa até 24h antes de serem colocados na câmara de carbonatação. Posteriormente foram transferidos para a sala de carbonatação, estando esta climatizada a (75±2)% de umidade e (23±2)°C de temperatura para período de sazonamento até completarem 91 dias (idade do ensaio) para então serem desembalados e inseridos na câmara de climática calibrada com UR= 65%, 23°C e 3% de CO_2 (Figura 3.18).

Figura 3.18 - Sala e câmara de carbonatação.

3.7.2.4. Determinação das profundidades de carbonatação

Para a determinação das profundidades de carbonatação os corpos-de-prova das misturas investigadas foram retirados da câmara de carbonatação em função das idades estabelecidas para o ensaio que foram de 4, 8, 12 e 16 semanas. Após a retirada foram rompidos diametralmente obtendo-se assim, duas amostras para cada corpo-de-prova que será analisado (Figuras 3.19 e 3.20). As duas partes geradas pela ruptura do corpo-de-prova possibilitou um maior número de leituras e consequentemente uma precisão maior para a determinação do coeficiente de carbonatação.

Figuras 3.19 e 3.20 – Rompimento diametral dos corpos de prova.

Para cada amostra gerada foi aspergida uma solução de fenolftaleína conforme especifica a RILEM CPC-18 e que foi dosada com a seguinte composição:

- 70g de álcool anidro
- 29g de água destilada
- 1g de fenolftaleína em pó

A aspersão fez com que a parte do concreto não carbonatado apresente coloração violeta, sendo visualmente identificada, enquanto que a parte carbonatada da amostra permanecerá com a cor natural do concreto (Figura 3.21).

(A) (B)

Figura 3.21 – (A) e (B) Corpos de prova com parte carbonatada (incolor) e não carbonatada (violeta).

Para se determinar as profundidades de carbonatação, cada face aspergida do corpo de prova foi fotografada e seguiu a seguinte metodologia:

- inseriu-se a fotografia no programa AutoCAD para que fosse colocada em escala,
- desenhou-se uma poligonal entre a área carbonatada e não carbonatada,
- traçou-se linhas perpendiculares e com espaçamento de 1mm da frente de carbonatação até a face superior do corpo-de-prova e dentro da poligonal obtida anteriormente,
- o comprimento das linhas foi determinado pela rotina COTA.LSP, desenvolvida em Autolisp por Dalla Lana (2005), que é uma linguagem de programação do AutoCAD e onde foram gravados diretamente num arquivo EXCEL da Microsoft, para posteriormente serem tratados estatisticamente.
- dos valores obtidos foram calculados a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação estipulado em 20%, sendo desprezados os valores limites (inferior e superior) de cada amostra, que ficaram fora deste intervalo. Estabeleceu-se em 60 como número mínimo de leituras de profundidades para cada mistura

3.7.2.5. Determinação dos coeficientes de carbonatação

A determinação dos coeficientes de carbonatação foi obtida através da regressão linear, que é um procedimento analítico que indica a profundidade carbonatada em função do tempo e será determinada em milímetros (mm).

Os coeficientes representam uma estimativa da velocidade do fenômeno nos concretos, sendo proporcional à profundidade carbonatada em um determinado período de avaliação. Dessa forma, para um dado tempo, quanto maior o coeficiente, mais rápida a propagação de CO_2 no interior do concreto.

É usual a representação da evolução da frente carbonatada pela equação 3.18:

$$x = k.t^n \qquad \text{(Equação 3.18)}$$

Sendo x a profundidade carbonatada, n em condições internas abrigadas usualmente igual a 0,5 e k o coeficiente de carbonatação uma constante que depende da difusão e concentração do CO_2, das condições de exposição e das características do concreto, sendo expressa usualmente em mm/ano^{0,5}. Também é empregada a equação 3.19:

$$x = k_1 + k_2.t^n \qquad \text{(Equação 3.19)}$$

Para melhor representação linear do desenvolvimento da carbonatação em função do tempo, considerando-se que grande parte destas equações não passa pela origem das coordenadas.

Para tal, os coeficientes foram calculados por regressão linear da raiz quadrada da idade cronológica de permanência dos corpos-de-prova na câmara de carbonatação estipulados em 4, 8, 12 e 16 semanas, com as respectivas profundidades carbonatadas. A obtenção destes coeficientes foi determinada pela equação f(x)=ax+b, sendo o coeficiente angular “a” considerado o coeficiente de carbonatação.

A figura 3.22 apresenta um exemplo do gráfico da regressão linear com a obtenção dos coeficientes de carbonatação acelerada.

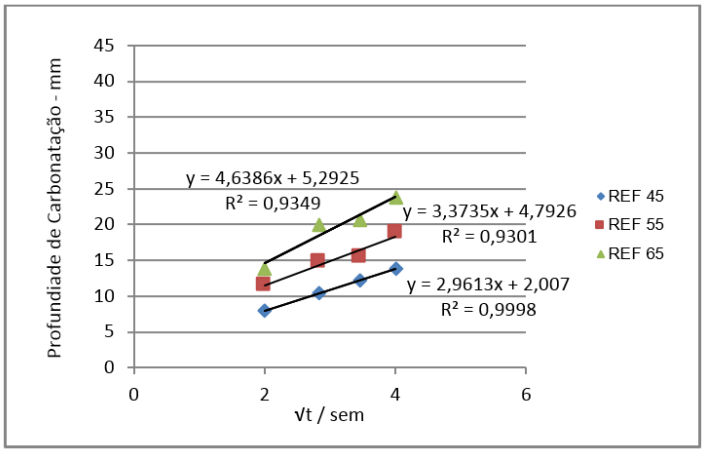


Figura 3.22 – Gráfico para o cálculo do coeficiente de carbonatação (Kc).

3.7.3 Ensaio de hidróxido de cálcio remanescente

Para a realização do ensaio de hidróxido de cálcio remanescente foram retiradas amostras de pó de cada mistura da parte carbonatada e não carbonatada após o tempo de permanência estabelecido na câmara climática.

A coleta foi feita com uma furadeira e aspirador com filtro para o pó, sendo este pulverizado com o uso de um almofariz e a porção retida na malha #200 foi peneirada novamente até se obter a quantidade de 20g passante nesta peneira (Figura 3.23).

Figura 3.23 – Pó obtido na peneira de malha # 200.

Depois deste procedimento as amostras foram imersas em álcool etílico, a fim de paralisar as reações de hidratação do cimento.

Na sequência as amostras foram secas em estufa a 60ºC por 24 horas e armazenadas em recipientes hermeticamente fechados (Figura 3.24) para serem enviadas para os ensaios químicos na ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland).

(A) (B)

Figura 3.24 – (A) Secagem das mostras em estufa 60ºC e
(B) Amostra em pó, em recipiente para ensaios ABCP.

O ensaio foi realizado conforme a norma NM 13:2013 Cimento Portland - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno-glicol que consiste em colocar 1 g de amostra em 30 ml de etileno-glicol a 65°C, agitada por 30 min.

Após filtrada, foi neutralizado o filtrado com ácido clorídrico por meio de uma titulação. O volume ácido utilizado é correlacionado ao teor de cal livre e como a massa da amostra é de 1 g, essa correlação é quase direta.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos primeiramente, conforme programa experimental, os resultados desta pesquisa em relação as profundidades e coeficientes de carbonatação acelerada em função do tempo de permanência em câmara climatizada e a influência das relações a/ag nas misturas.

Posteriormente, serão analisados na ordem que segue os seguintes assuntos:

- Análise dos teores de hidróxido de cálcio remanescente (CH)

- Análise dos coeficientes de carbonatação em relação à compressão axial

- Análise dos coeficientes de carbonatação em igualdade de resistência

- Análise dos teores de hidróxido de cálcio remanescente (CH) em igualdade de resistência

4.1 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO

Para a obtenção das profundidades de carbonatação, todos os corpos-de-prova das misturas investigadas foram pré-condicionados de acordo com a RILEM TC 116-PCD (1999), que tem como objetivo dotá-los de uma concentração de umidade em equilíbrio de 75 ± 2%, temperatura de 23 ± 2°C com uma distribuição uniforme de água evaporável para que então pudessem ser armazenados na câmara climática.

Os quadros 9 e 10 a seguir apresentam as profundidades de carbonatação acelerada em milímetros (mm) das misturas com CPII-Z e CP-IV após 4, 8, 12 e 16 semanas de ensaio na câmara de carbonatação com UR=65%, 23°C e 3% de CO_2.

Quadro 9 - profundidade de carbonatação com CPII-Z – (mm).

MISTURA	a/ag	4 SEMANAS	8 SEMANAS	12 SEMANAS	16 SEMANAS
REF	0,45	7,92	10,42	12,22	13,87
	0,55	11,52	14,88	15,36	18,88
	0,65	13,86	19,94	20,67	23,72
CCAN 15%	0,45	9,27	11,71	13,44	16,06
	0,55	12,82	16,65	19,79	22,72
	0,65	17,74	22,60	24,57	28,43
CCAM 15%	0,45	8,83	11,67	13,19	17,34
	0,55	12,92	16,51	19,27	24,48
	0,65	16,52	21,75	24,87	29,44

Quadro 10 - profundidade de carbonatação com CP-IV – (mm).

MISTURA	a/ag	4 SEMANAS	8 SEMANAS	12 SEMANAS	16 SEMANAS
REF	0,45	9,97	13,56	16,51	18,94
	0,55	13,40	17,87	22,92	25,27
	0,65	16,37	21,17	28,82	31,42
CCAN 15%	0,45	11,87	15,47	18,30	22,73
	0,55	16,48	21,48	27,94	30,68
	0,65	23,74	28,43	34,55	42,62
CCAM 15%	0,45	14,22	16,78	23,20	25,62
	0,55	19,01	22,44	29,81	34,78
	0,65	23,31	28,86	36,28	44,12

Verificou-se para todas as misturas, que a profundidade de carbonatação foi aumentando conforme aumentava a relação a/ag e o tempo de exposição ao CO_2.

Todas as misturas contendo adições de CCAN e CCAM obtiveram maiores profundidades de carbonatação em relação às misturas de REF, haja vista que possuem menores teores de hidróxido de cálcio que os concretos sem estas adições (REF com 100% de cimento) e também dependem da distribuição da rede de poros. As misturas de CPII-Z contendo CCAN obtiveram profundidades muito próximas das misturas com CCAM para as idades de 4 até 12 semanas, predominando profundidades ligeiramente superiores. Para a idade de 16 semanas verificou-se que as misturas com CCAN, quando comparadas com as de CCAM, foram menores para todas as relações a/ag. Já para as misturas de CP-IV de CCAN observou-se que estas foram predominantemente menores para todas as idades e relações a/ag com exceção da relação 0,65 para 4 semanas que, comparadas com as misturas de CCAM foram relativamente próximas. Observou-se também que os cimentos utilizados nas misturas (CPII-Z e CP-IV) influenciaram nas profundidades de carbonatação em função dos teores de

adições (conforme especifica a norma) presentes nas suas composições, onde, para todas as misturas investigadas com o cimento CP-IV que possui um percentual de 50% de material pozolânico, as profundidades de carbonatação foram maiores quando comparadas com as do CPII-Z que possui 14% deste material. Os quadros 9 e 10 das análises dos resultados das profundidades de carbonatação comprovam conforme literatura estudada que, para a idade de 16 semanas, em vista do maior tempo de permanência das misturas na câmara climatizada, estas apresentaram profundidades de carbonatação maiores as demais idades, o que já era esperado. As figuras 4.1 e 4.2 mostram a neutralização do concreto em função dos cimentos utilizados (CPII-Z e CP-IV) e suas relações a/ag (0,45; 0,55 e 0,65) onde percebe-se uma grande influência não só das relações a/ag, mas também, do tipo de cimento utilizado no resultado das profundidades de carbonatação.

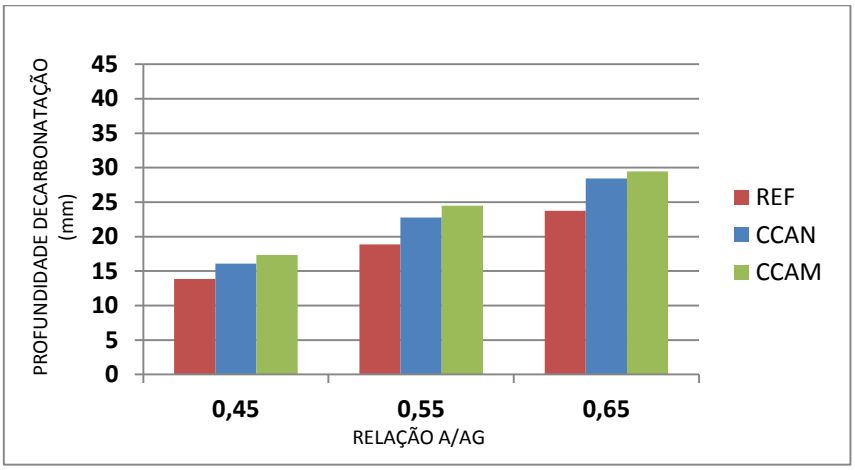


Figura 4.1 - Profundidade de carbonatação 16 semanas - CPII-Z x rel a/ag – (mm).

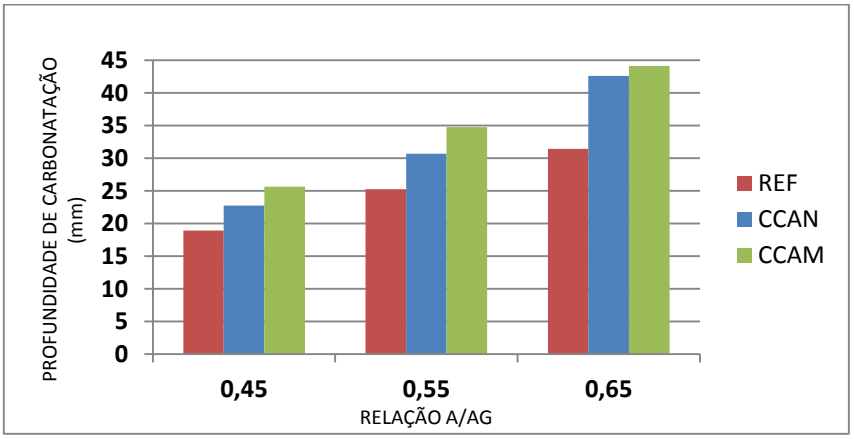


Figura 4.2 - Profundidade de carbonatação 16 semanas - CP-IV x rel a/ag – (mm).

A relação a/ag 0,45 mostra que os concretos com adições de cinza de casca de arroz natural (CCAN) para os dois tipos de cimentos utilizados (CPII-Z e CP-IV), as profundidades de carbonatação foram maiores do que as de referência (REF). Da mesma forma pode ser verificado que, para a relação a/ag 0,55 as profundidades de carbonatação foram maiores em relação as profundidades de 0,45 e menores para a relação 0,65. Os concretos feitos com cinza de casca de arroz moída (CCAM) seguiram a mesma tendência. Apresentaram profundidades de carbonatação maiores quando comparados com os concretos de REFERÊNCIA e CCAN à medida que aumentava as relações a/ag.

Com relação aos cimentos utilizados, as misturas feitas com CP-IV obtiveram maiores profundidades de carbonatação em relação às misturas feitas com CPII-Z. Para todas as amostras moldadas com a incorporação de 15% de CCAN e CCAM, as profundidades de carbonatação foram maiores, respectivamente, de 20% a 35% para CCAN e 35% a 40% para CCAM com CPIV, e de 16% a 21% para CCAN e 24% a 30% para CCAM com CPII-Z, quando comparadas com as misturas de referência e as relações a/ag empregadas. Tais fatos podem ser explicados; em primeiro lugar, que a CCAM é mais reativa devido as dimensões de suas partículas quando comparadas com a CCAN e, em segundo, o teor de materiais pozolânicos presentes no CP-IV é maior do que o do CPII-Z. Estes dois fatores associados a quantidade de água crescente empregada nas misturas fazem diminuir a compacidade do concreto acelerando a frente de carbonatação devido as reações pozolânicas que consomem o hidróxido de cálcio presente na solução dos poros do concreto. Com isso, pode-se afirmar que, entre todas as misturas ensaiadas, os concretos de referência foram os que obtiveram as menores profundidades de carbonatação devido a estrutura de rede de poros (que está associada a velocidade de penetração do CO_2) e as maiores reservas alcalinas (quantidade de CH e demais álcalis presentes no cimento Portland) a serem consumidas pelo CO_2 nas reações de neutralização.

4.2 COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO ACELERADA – Kc

A determinação dos coeficientes de carbonatação foi obtida através da regressão linear, que é um procedimento analítico que indica a profundidade carbonatada em função

do tempo determinada em milímetros (mm), e são obtidos através da raiz quadrada da idade cronológica de permanência dos corpos-de-prova em câmara de carbonatação.

A obtenção destes coeficientes foi determinada pela equação f(x)=ax+b, sendo o coeficiente angular "a" considerado o coeficiente de carbonatação. Os quadros 11 e 12 abaixo, mostram os coeficientes de carbonatação acelerada para a idade de 16 semanas das misturas analisadas com CPII-Z e CP-IV.

Quadro 11 - coeficiente de carbonatação acelerada (kc) – CPII-Z / 16 semanas.

MISTURA	CPII-Z		
	a/ag	Kc	r^2
REF	0,45	2,96	1,00
	0,55	3,37	0,93
	0,65	4,64	0,94
CCAN 15%	0,45	3,30	0,98
	0,55	4,93	1,00
	0,65	5,12	0,98
CCAM 15%	0,45	4,00	0,94
	0,55	5,54	0,96
	0,65	6,28	0,99

Quadro 12 - coeficiente de carbonatação acelerada (kc) – CP-IV / 16 semanas.

MISTURA	CP-IV		
	a/ag	Kc	r^2
REF	0,45	4,49	1,00
	0,55	6,13	0,99
	0,65	7,93	0,97
CCAN 15%	0,45	5,26	0,97
	0,55	7,38	0,99
	0,65	9,25	0,95
CCAM 15%	0,45	6,05	0,95
	0,55	8,10	0,96
	0,65	10,35	0,97

Percebe-se que os valores mínimos de r^2 das tabelas acima ficaram de 0,93 para as misturas com CPII-Z e 0,95 para as misturas com CP-IV, indicando através destes que existe uma boa correlação dos coeficientes (Kc) analisados e suas respectivas relações a/ag.

4.3 COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO (Kc) x RELAÇÃO A/AG - CPII-Z

Os valores dos coeficientes de carbonatação obtidos para os concretos de referência (REF) com CPII-Z e suas relações a/ag 0,45; 0,55 e 0,65 foram respectivamente 2,96mm/√semana, 3,37mm/√semana e 4,64mm/√semana; observando-se um acréscimo de 14% e 57% para as respectivas relações a/ag de 0,55 e 0,65 quando comparadas com a relação a/ag 0,45, conforme mostra a figura 4.3.

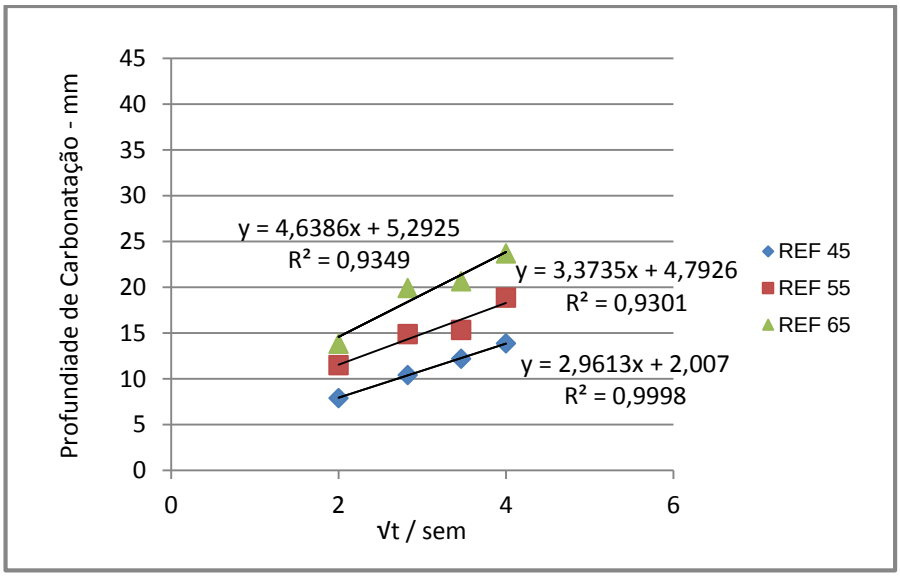


Figura 4.3 – Coeficiente Kc X rel a/ag – CPII-Z (REF).

Para as misturas contendo 15% de adição de cinza de casca de arroz natural (CCAN), os coeficientes de carbonatação (Kc) obtidos para as relações a/ag 0,45; 0,55 e 0,65 foram 3,30mm/√semana, 4,93mm/√semana e 5,12mm/√semana respectivamente, observando-se um acréscimo de 49% e 55% para as respectivas relações a/ag de 0,55 e 0,65 quando comparadas com a relação a/ag 0,45, conforme mostra a figura 4.4.

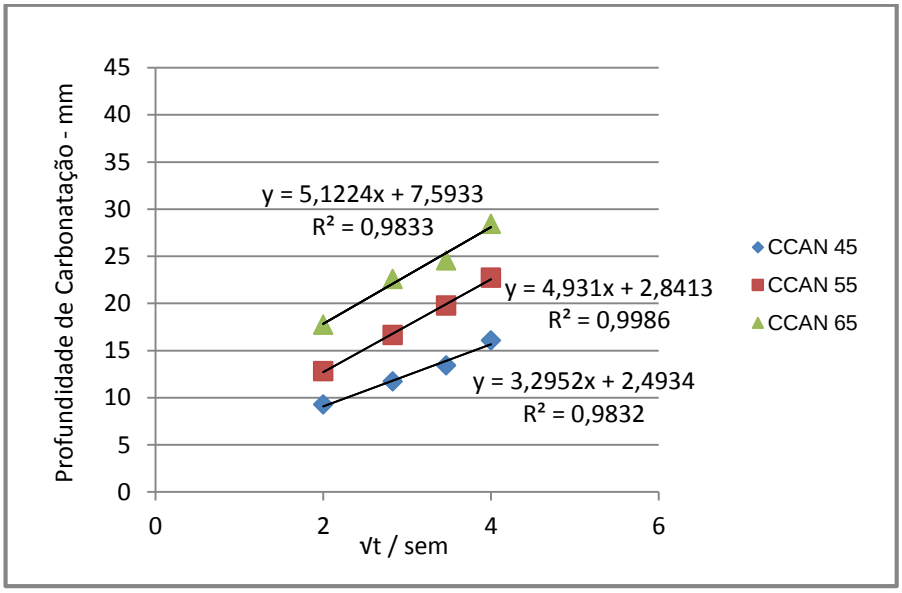


Figura 4.4 – Coeficiente Kc X rel a/ag – CPII-Z (CCAN)

Já para as misturas contendo 15% de adição de cinza de casca de arroz moída (CCAM), os coeficientes de carbonatação obtidos para as relações a/ag 0,45; 0,55 e 0,65 foram de 4,00mm/√semana, 5,54mm/√semana e 6,28mm/√semana respectivamente, observando-se um acréscimo de 39% e 57% para as respectivas relações a/ag de 0,55 e 0,65 quando comparadas com a relação a/ag 0,45, conforme mostra a figura 4.5.

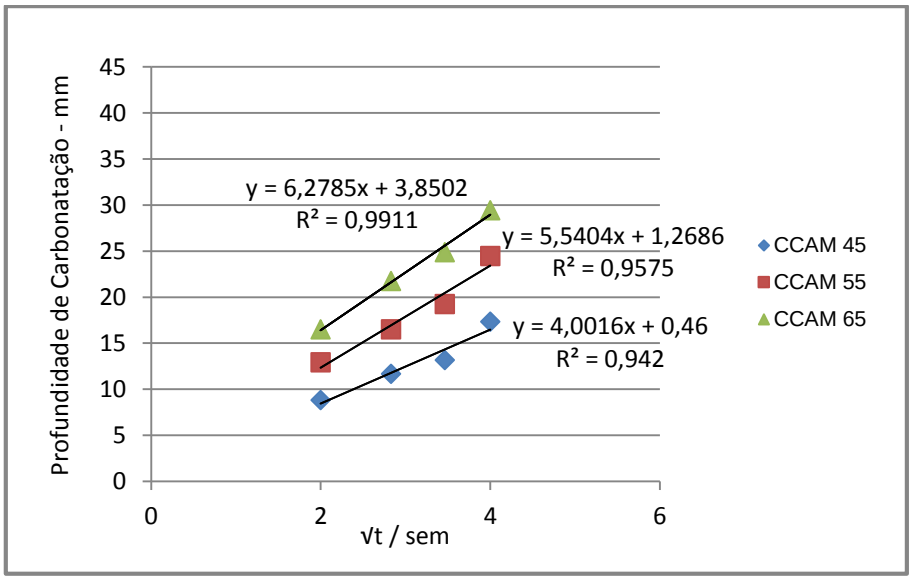


Figura 4.5 – Coeficiente Kc X rel a/ag – CPII-Z (CCAM).

4.4 COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO (Kc) X RELAÇÃO A/AG - CP-IV

Os valores dos coeficientes de carbonatação obtidos para os concretos de referência (REF) com CP-IV e suas relações a/ag 0,45; 0,55 e 0,65 foram respectivamente 4,49mm/√ semana, 6,13mm/√semana e 7,93mm/√semana; observando-se um acréscimo de 36% e 77% para as respectivas relações a/ag de 0,55 e 0,65 quando comparadas com a relação a/ag 0,45, conforme mostra a figura 4.6.

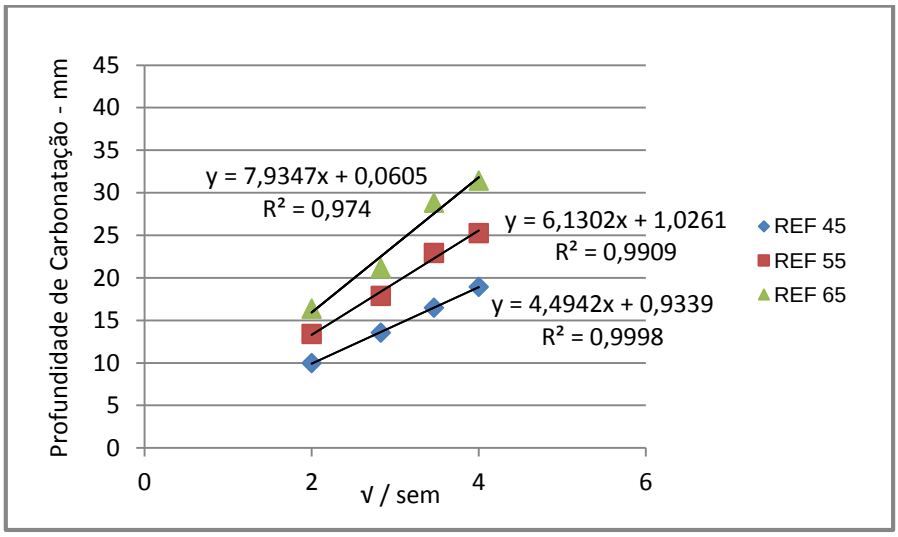


Figura 4.6 – Coeficiente Kc X rel a/ag – CP-IV (REF).

Para as misturas contendo 15% de adição de cinza de casca de arroz natural (CCAN), os coeficientes de carbonatação (Kc) obtidos para as relações a/ag 0,45; 0,55 e 0,65 foram 5,26mm/√semana, 7,38mm/√semana e 9,25mm/√semana respectivamente, observando-se um acréscimo de 41% e 76% para as respectivas relações a/ag de 0,55 e 0,65 quando comparadas com a relação a/ag 0,45, conforme mostra a figura 4.7.

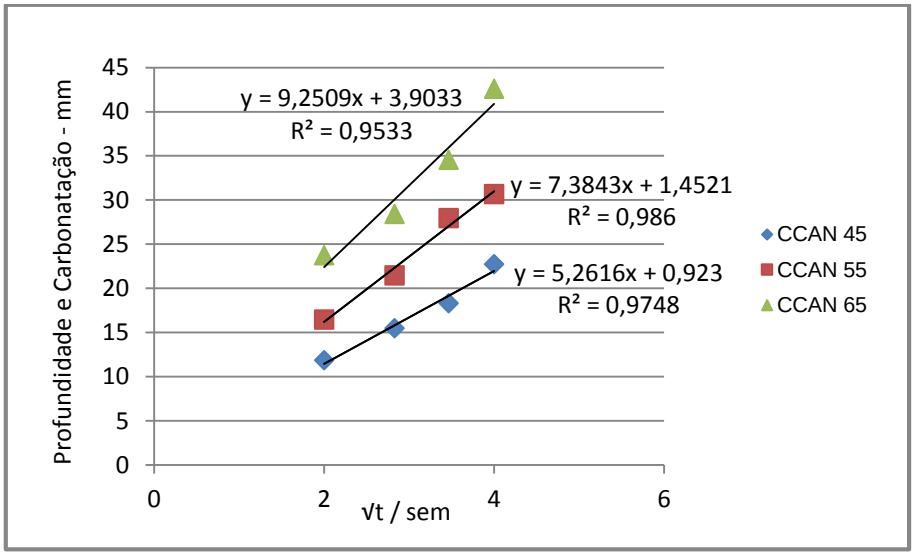


Figura 4.7 – Coeficiente Kc X rel a/ag – CPII-Z (CCAN).

Já para as misturas contendo 15% de adição de cinza de casca de arroz moída (CCAM) os coeficientes de carbonatação (Kc) obtidos para as relações a/ag 0,45; 0,55 e 0,65 foram de 6,05mm/√semana, 8,10mm/√semana e 10,35mm/√semana respectivamente, observando-se um acréscimo de 34% e 71% para as respectivas relações a/ag de 0,55 e 0,65 quando comparadas com a relação a/ag 0,45, conforme mostra a figura 4.8.

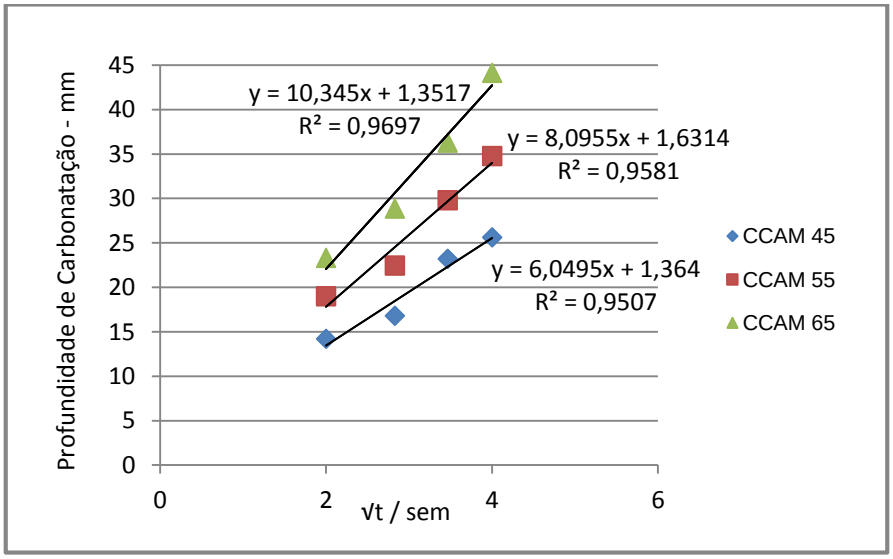


Figura 4.8 – Coeficiente Kc X rel a/ag – CP-IV (CCAM).

Em suma, para todas as misturas analisadas nos gráficos anteriores confirmou-se o esperado, onde, os coeficientes de carbonatação independentemente da mistura e tipo de cimento, foram crescentes com o aumento da relação a/ag. Também verificou-se que os maiores coeficientes de carbonatação foram obtidos nas misturas com o cimento CP-IV, para todas as relações a/ag estudadas quando comparados com o cimento CPII-Z e que a seguir serão analisados.

4.5 COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO (Kc) - CPII-Z X CP-IV

Para melhor interpretação dos coeficientes de carbonatação acelerada obtidos nos gráficos anteriores, foi gerado um único gráfico comparativo destes coeficientes tendo como finalidade analisar os dois tipos de cimentos utilizados (CPII-Z e CP-IV), suas misturas e relações a/ag conforme mostra a figura 4.9.

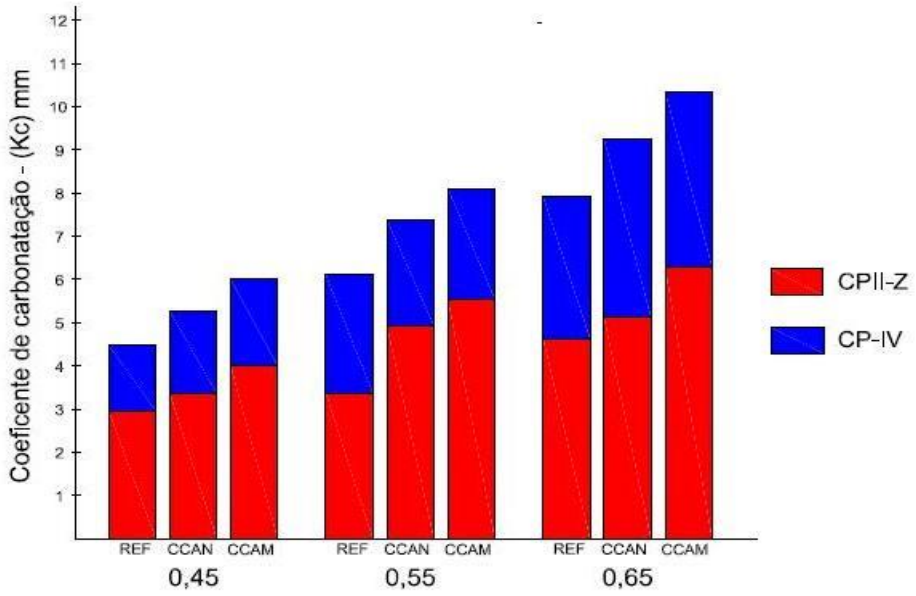


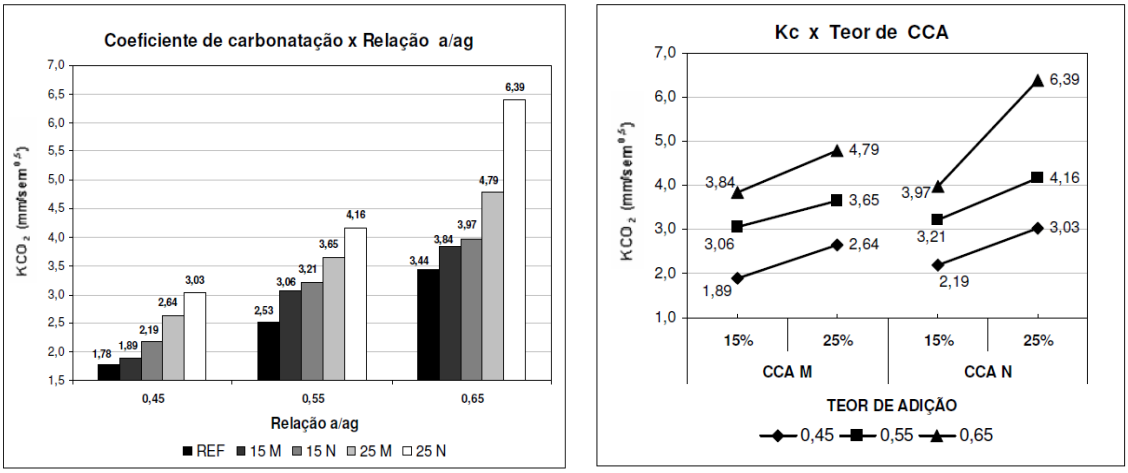
Figura 4.9 - Coeficientes de carbonatação (Kc) - CPII-Z X CP-IV.

Assim como analisado para as profundidades, os coeficientes de carbonatação acelerada (Kc) foram superiores para todas as misturas com o cimento CP-IV quando comparados com as do CPII-Z. Conforme aumenta as relações a/ag, cresce as profundidades carbonatadas e, consequentemente, seus coeficientes de carbonatação, pois a porosidade está relacionada diretamente com a água de amassamento do concreto.

Em vista disso, os resultados dos coeficientes de carbonatação para as misturas de CP-IV quando comparadas com as do CPII-Z e suas respectivas relações a/ag foram de 52%, 82% e 71% maiores em relação às de REFERÊNCIA. Para as misturas com adições de 15% de CCA residual, houve um acréscimo de 59%, 50% e 81% para as misturas de CCAN, e 51%, 46% e 65% para as misturas de CCAM. Além dos resultados obtidos em função das relações a/ag, o tipo de CCA residual (CCAN e CCAM) e dos cimentos utilizados (CPII-Z e CPIV) foram determinantes para os resultados obtidos nesta pesquisa.

Pesquisas realizadas por ISAIA (1995), VENQUIARUTO (2002), HOPPE (2008), assim como demais autores já citados, confirmam que os tipos e teores de adições minerais empregadas nas misturas associadas ou não entre si, e ao tipo de cimento utilizado intervém nas profundidades e coeficientes de carbonatação.

Hoppe (2008) investigou a carbonatação acelerada com teor de CO_2 de 5% e U.R= 75% em idades de 0, 3, 6, 9 e 12 semanas para misturas contendo adições de 15% e 25% de CCAN e CCAM respectivamente de substituição em massa do CPII-F. Sendo o objetivo de sua pesquisa, a incorporação de CCAN (in natura sem moagem) como adição mineral para concreto estrutural. A figura 4.10 (A) e (B) mostram respectivamente os resultados dos Kc x Rel. a/ag e o Kc x Teor de CCA das misturas com CPII-F investigadas pelo mesmo autor.



(A) (B)

Figura 4.10 - (A) coeficiente de carbonatação (Kc) x relação a/ag e
(B) coeficientes de carbonatação x teor de CCA – (HOPPE, 2008).

Pode-se observar através que à medida que a relação a/ag aumenta, os coeficientes de carbonatação também aumentam, sendo estes, maiores à medida que o teor de adição foi incorporado nas misturas com CCAN quando comparados com as CCAM. Pois, o processo de moagem em moinho de bolas reduz o tamanho das partículas da CCA e por consequência acelera a reatividade da mistura com o CH proveniente da reação de hidratação do cimento gerando uma microestrutura mais densa e compacta. Porém, o uso de adições minerais consome o CH nas reações pozolânicas reduzindo o PH do concreto facilitando com isso a neutralização do concreto e por consequência, o processo de carbonatação.

4.6 TEOR DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO

O quadro 13 apresenta os resultados obtidos no ensaio do teor de hidróxido de cálcio remanescente e os coeficientes de carbonatação das misturas na idade de 91 dias para os cimentos CPII-Z e CP-IV. As figuras 4.11 e 4.12 apresentam os valores encontrados dos teores de CH remanescente para as três relações a/ag utilizadas neste experimento das zonas não carbonatadas (NC) e zonas carbonatadas (C) respectivamente.

Quadro 13 - Coeficientes de carbonatação (Kc) em mm/sem.$^{-0,5}$ e teores de hidróxido de cálcio, em %, para as zonas não carbonatadas (NC) e carbonatadas (C), para as relações a/ag estudadas.

Misturas	a/ag	CPII-Z (MPa)			CPIV (MPa)			CPIV/CPIIZ		
		Kc	CH/NC	CH/C	Kc	CH/NC	CH/C	Kc	NC	C
REF	**0,45**	2,96	4,86	0,76	4,49	0,52	0,35	1,52	0,11	0,46
	0,55	3,37	4,87	0,96	6,13	0,57	0,39	1,82	0,12	0,41
	0,65	4,64	5,36	1,00	7,93	0,61	0,43	1,71	0,11	0,43
CCAN	**0,45**	3,30	2,95	0,81	5,26	0,29	0,23	1,59	0,10	0,28
	0,55	4,93	3,51	0,99	7,38	0,32	0,29	1,50	0,09	0,29
	0,65	5,12	3,70	1,55	9,25	0,34	0,34	1,81	0,09	0,22
CCAM	**0,45**	4,00	2,14	0,58	6,05	0,34	0,22	1,51	0,16	0,38
	0,55	5,54	2,37	0,71	8,10	0,39	0,23	1,46	0,16	0,32
	0,65	6,28	2,52	0,97	10,35	0,41	0,25	1,65	0,16	0,42
CCAN/CCAM	**0,45**	0,83	1,38	1,40	0,87	0,85	1,05			
	0,55	0,89	1,48	1,39	0,91	0,82	1,26			
	0,65	0,82	1,47	1,60	0,89	0,83	1,16			
CCAN/REF	**0,45**	1,11	0,61	1,07	1,17	0,56	0,66			
	0,55	1,46	0,72	1,03	1,20	0,56	0,74			
	0,65	1,10	0,69	1,55	1,17	0,56	0,79			

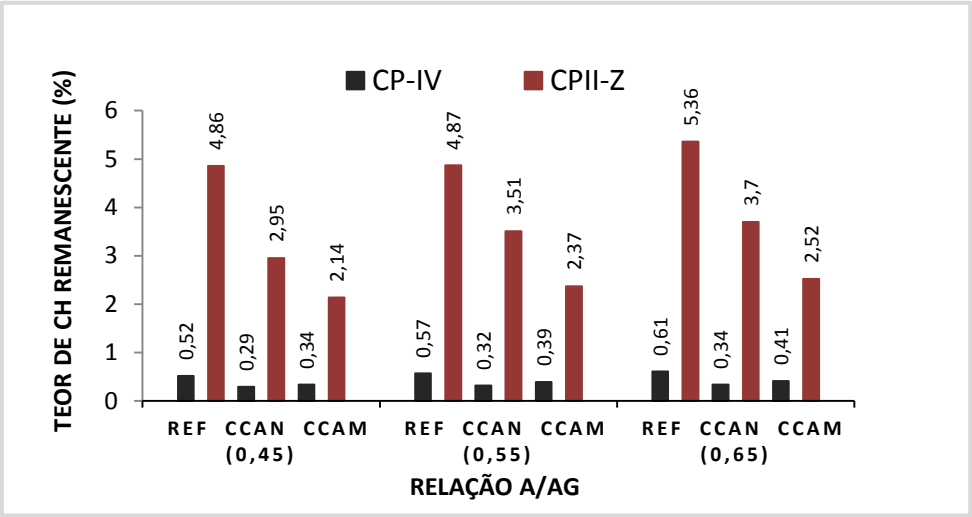


Figura 4.11 - Teor de CH remanescente (%)
das zonas não carbonatadas (NC) X a/ag das misturas CP-IV e CPII-Z.

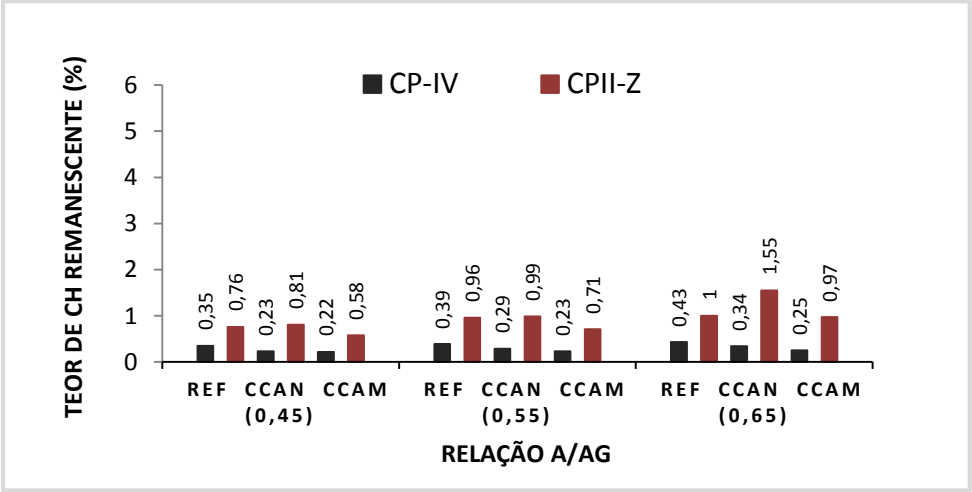


Figura 4.12 – Teor de CH remanescente (%)
das zonas carbonatadas (C) X a/ag das misturas CP-IV e CPII-Z.

Analisando os resultados através da figura 4.11, verifica-se para as zonas não carbonatadas (CH/NC) que todos os traços com a menor relação a/ag (0,45) e para os dois tipos de cimentos (CPII-Z e CP-IV) apresentaram os menores teores de CH. Com o aumento das relações a/ag para 0,55 e 0,65 observou-se a progressão destes quando comparados com a a/ag 0,45. O mesmo ocorreu para a figura 4.12, que mostra os teores remanescentes de CH das zonas carbonatadas (CH/C).

Observou-se também que os teores de CH das misturas com CPII-Z foram maiores quando comparados com as de CP-IV tanto na zona CH/NC como na CH/C para todas as

misturas. Este fato ocorreu devido as relações a/ag mais elevadas (0,55 e 0,65) possuírem maior porosidade e por consequência, maior espaço para a formação de CH, já que este possui maiores dimensões que os outros compostos hidratados e pelas características dos dois tipos de cimentos utilizados onde, o CP-IV, por possuir um percentual mais elevado de materiais pozolânicos, consumiu mais rapidamente o CH presente nas misturas de CP-IV do que nas de CPII-Z.

Quando comparados com os traços de REF, as misturas de CPII-Z com CCAN apresentaram para as relações a/ag 0,45; 0,55 e 0,65 teores de CH menores em 39%; 28% e 31%, respectivamente. Já, quando comparados com os traços de CCAM para as mesmas relações, os teores de CH das misturas de CCAN foram maiores em 38%; 48% e 47%.

Os traços de CP-IV com adição de CCAN quando comparados com os de REF seguiram a mesma tendência dos traços com CPII-Z, ou seja, os teores de CH também foram menores para as relações a/ag de 0,45; 0,55 e 0,65 respectivamente em 46%; 22% e 44%. Porém, quando comparado com os valores dos teores de CH das misturas de CCAM permaneceram menores em 15%, 18% e 17%, diferenciando-se dos resultados obtidos com CPII-Z que obtiveram teores de CH maiores.

Os resultados evidenciam que as misturas com adição de CCA apesar de promoverem a densificação da pasta, reduzindo a permeabilidade do concreto, faz consumir uma maior quantidade de CH devido as reações pozolânicas com a sílica amorfa presente na CCA, assim, acelerando o processo de carbonatação. Isto que vem ao encontro com a bibliografia consultada e que, segundo Neville (1997), a diminuição dos teores de CH nos poros do concreto, induzida pelas reações pozolânicas, faz com que seja necessário uma menor quantidade de CO_2 para reagir com o CH e com isso, formar os carbonatos.

Com isso, conclui-se que, com a menor quantidade de CH para reagir, a difusão do CO_2 nos poros torna-se mais rápida, aumentando a velocidade de carbonatação. Ainda comparando-se os teores de CH, nota-se também que, as quantidades reduzidas na figura 4.12 (zonas carbonatadas) em relação as da figura 4.11 (zonas não carbonatadas) para todas as misturas, estão de acordo com literatura pesquisada, pois sabe-se que, as faces externas dos CP's por estarem mais expostas ao CO_2 possuem um maior consumo de CH do que da figura 4.11 (zonas não carbonatadas) onde a reserva alcalina é maior por estar mais no interior do concreto.

A tabela mostra também que, todas as misturas de CP-IV obtiveram os maiores valores de Kc, assim como os menores teores de CH remanescente quando comparados com as de CPII-Z, sendo as misturas de REF as que apresentaram as maiores reservas de CH quando comparadas com as de CCAN e CCAM.

4.7 COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO EM IGUALDADE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Sabe-se que a resistência à compressão axial é uma propriedade de grande importância para experimentos, pois através dela pode-se comparar misturas em diferentes idades, como também, relacionar entre si o comportamento das demais propriedades nas misturas do concreto. Nesta etapa serão analisados os resultados dos coeficientes de carbonatação (Kc), os teores de CH remanescentes e a influência da relação a/ag no comportamento das misturas investigadas com os cimentos CPII-Z e CP-IV aos 91 dias reportando-se ao quadro 13.

Quadro 14 – Coeficientes de carbonatação (Kc) em mm/sem.$^{-0,5}$ e teores de hidróxido de cálcio em % para as zonas não carbonatadas (NC) e carbonatadas (C) em igualdade de resistência à compressão axial.

f_{ck}	s_d MPa	f_{c28} MPa	Misturas	Cimento CPIIZ				Cimento CPIV				CPIV/CPIIZ		
				a/ag	Kc	CH NC	CH C	a/ag	Kc	CH NC	CH C	Kc	CH NC	CH C
C20	5,5	29,0	REF	0,62	4,20	5,20	0,99	0,50	5,29	0,56	0,39	1,26	0,11	0,39
			CCAN	0,55	4,51	3,41	1,15	0,48	5,94	0,31	0,29	1,32	0,09	0,25
			CCAM	0,58	5,68	2,41	0,82	0,51	7,26	0,38	0,24	1,28	0,16	0,29
C25	4,0	31,6	REF	0,57	3,76	5,07	0,96	0,47	4,80	0,55	0,38	1,28	0,11	0,40
			CCAN	0,52	4,22	3,29	1,08	0,45	5,24	0,30	0,28	1,24	0,09	0,26
			CCAM	0,55	5,34	2,35	0,71	0,48	6,65	0,37	0,23	1,25	0,16	0,32
C30	4,0	36,6	REF	0,55	3,59	4,87	0,94	0,42	4,04	0,54	0,37	1,13	0,11	0,39
			CCAN	0,46	3,60	3,04	0,96	0,40	3,97	0,30	0,26	1,10	0,10	0,27
			CCAM	0,48	4,49	2,21	0,69	0,43	5,66	0,37	0,23	1,26	0,17	0,33
C30/C20			REF		0,85	0,94	0,95		0,76	0,96	0,95			
			CCAN		0,80	0,89	0,83		0,67	0,97	0,90			
			CCAM		0,79	0,92	0,84		0,78	0,97	0,96			
CCAN/CCAM			C20		0,79	1,41	1,40		0,82	0,82	1,16			
			C25		0,79	1,40	1,52		0,79	0,81	1,22			
			C30		0,80	1,38	1,39		0,70	0,81	1,13			
CCAN/REF			C20		1,07	0,66	1,16		1,12	0,82	0,74			
			C25		1,12	0,65	1,13		1,09	0,81	0,74			
			C30		1,00	0,62	1,02		0,98	0,81	0,70			

Para tal, foram considerados 3 níveis de resistência característica C20, C25 e C30 e para o cálculo da resistência de dosagem aos 28 dias tomou-se o desvio padrão de 4,0 MPa, resultados em f_{c28} 31,6 MPa e 36,6 MPa. Para o fck de 20Mpa tomou-se sd= 9,0Mpa, para cumprir os requisitos da ABNT NBR 12655:2014.

Para melhor ilustrar e analisar os resultados do quadro 14, foi montada a figura 4.13 que segue.

Através da figura 4.13 verifica-se que para todas as misturas com CPII-Z e CP-IV respectivamente, à medida que aumentou a resistência mecânica, houve um decréscimo dos seus coeficientes de carbonatação acelerada, confirmando-se a influência que a resistência à compressão axial exerce sobre os coeficientes de carbonatação.

A figura 4.13 sintetiza os resultados obtidos de todas as misturas com os cimentos (CPII-Z e CP-IV) em igualdade de resistência.

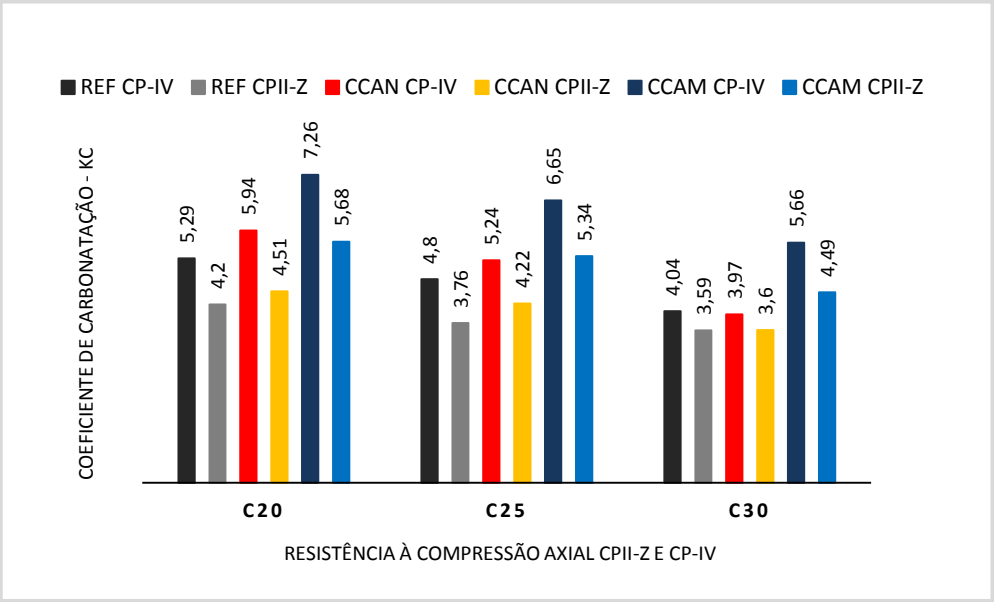


Figura 4.13 - Coef. de carbonatação (Kc) em igualdade de resistência das misturas CPII-Z x CP-IV.

Observa-se que todas as misturas com CP-IV obtiveram coeficientes de carbonatação com valores maiores para todas as resistências (C20, C25 e C30) quando comparados com os de CPII-Z, sendo os menores coeficientes observados para a resistência C30.

Os menores coeficientes de carbonatação (Kc) ocorreram nas misturas de REF para os dois cimentos (CPII-Z e CP-IV), reduzindo-se os mesmos à medida que a resistência à

compressão axial aumentou de C20 para C30, o que já era esperado pois, misturas com substituição parcial de cimento por adição de CCA ao mesmo tempo que ocorre o refinamento dos poros melhorando a microestrutura do concreto, tendem a produzir menores teores de CH e o consumo maior destes, devido as reações pozolânicas com a sílica das CCA, o que ocasiona uma reserva alcalina menor e, com isto, um aumento na velocidade das reações de carbonatação.

Em vista disto, verificou-se que, quando comparados com as misturas de referência (REF) os coeficientes de cabonatação das misturas de CPII-Z e CCAN foram maiores em 7% e 12% para as resistências de C20 e C25 (mesmo com o aumento da resistência houve acréscimo do Kc) respectivamente, igualando-se na resistência C30. Já para as misturas de CP-IV e CCAN quando comparadas com os de REF, obtiveram valores de Kc semelhantes e também maiores, porém, decrescendo com o aumento da resistência. Os valores foram respectivamente 12% e 9% para as resistências de C20 e C25, sendo que, para a resistência C30, o valor do coeficiente de carbonatação para a mistura de CP-IV e CCAN foi 2% menor quando comparado com o de REF.

Comparando-se as misturas de CPII-Z e CCAN com as de CCAM, observou-se que as de CCAN foram menores aproximadamente 20% para as três resistências (C20, C25 e C30). Para as misturas de cimento CP-IV e CCAN os coeficientes mantiveram-se próximos aos obtidos com o CPII-Z, ou seja, menores aproximadamente em 20% para as resistências C20 e C25, sendo que, para a resistência C30 os coeficientes de carbonatação obtiveram um acréscimo de 10%, aumentando a diferença para 30% quando comparadas com os de CCAM.

4.8 TEOR DE CH EM IGUALDADE DE RESISTÊNCIA

Assim como para os coeficientes de carbonatação (Kc), observou-se que a relação a/ag, responsável pela igualdade de resistência das misturas, também influenciou nos teores de CH, onde, através do quadro 14 verificou-se que, com o aumento da resistência, reduziu-se todas as relações a/ag, constatando-se que, a menor relação a/ag de cada mistura (REF, CCAN e CCAM) apresentaram os menores teores de CH. As de maiores relação a/ag apresentaram maior porosidade e, consequentemente, maiores teores de CH devido ao maior espaço para a formação das moléculas de CH.

As três misturas com CPII-Z apresentaram redução no teor de CH para as duas zonas estudadas (zona não carbonatada - CH/NC e zona carbonatada - CH/C). As misturas de CP-IV seguiram a mesma tendência, porém, estabilizando a redução dos teores de CH nas resistências C25 para C30 das misturas de CCAN e CCAM nas zonas não carbonatadas (CH/NC) e para as de CCAM nas zonas carbonatadas (CH/C).

Observou-se que, para todo o aumento de resistência com CPII-Z, as relações a/ag das misturas com CCAN foram menores, porém, obtiveram teores de CH mais maiores para as duas zonas estudadas (CH/NC e CH/C) quando comparadas com as de CCAM. Os teores de CH das misturas com CCAN foram maiores em 41%, 40% e 39% para zona não carbonatada (CH/NC) e 40%, 52% e 39% para as zonas carbonatadas (CH/C) para as resistências C20, C25 e C30, respectivamente.

Para as misturas com CP-IV, observou-se as mesmas condições a/ag das misturas descritas para o CPII-Z, ou seja, relação a/ag menores, inclusive, menores ainda, quando comparadas ao CPII-Z. Porém, enquanto para a zona não carbonatada (CH/NC) das CCAN os teores de CH foram menores em 18%, 19% e 19% quando comparadas com as CCAM para as mesmas resistências, os teores de CH das zonas carbonatadas (CH/C) foram maiores em 16%; 22% e 13%.

Em comparação com as misturas de REF, observou-se que os teores de CH das zonas não carbonatadas (CH/NC) foram menores para os dois tipos de cimentos utilizados (CPII-Z e CP-IV).

Os teores das misturas de CPII-Z foram menores em 44%, 45% e 46% e para as de CP-IV em 18%, 19% e 19% para as respectivas resistências C20, C25 e C30.

Para as zonas carbonatadas (CH/C) de CPII-Z, observou-se que os teores de CH das CCAN foram maiores em 16%, 13% e 2% para as três resistências quando comparados com os de REF. Já para as misturas de CP-IV permaneceram menores em 26%, 26% e 30%.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÃO

Este capítulo tem por objetivo, a partir da análise dos resultados obtidos nos ensaios e através da bibliografia pesquisada, compilar respostas aos questionamentos levantados nos objetivos específicos desta dissertação.

5.1 PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO

A partir dos resultados apresentados, verificou-se que, quanto maior o tempo de exposição ao CO_2 (4, 8, 12 e 16 semanas) e crescente relação a/ag (0,45; 0,55 e 0,65), maiores foram as profundidades de carbonatação das misturas investigadas, predominando para todos os concretos compostos de CP-IV maiores profundidades quando comparadas com as de CPII-Z.

As misturas de REF e menor relação a/ag (0,45) de ambos os cimentos (CPII-Z e CP-IV) foram as que apresentaram as menores profundidades carbonatadas quando comparadas com as demais misturas (CCAN e CCAM). Para uma mesma relação a/ag, as misturas de CCAN obtiveram profundidades de carbonatação intermediárias, ou seja, menores para a CCAM e maiores para as de REF para todas as relações a/ag estudadas.

Os resultados comprovam que, com o aumento da relação a/ag, aumenta a porosidade do concreto, e com isso, as profundidades de carbonatação devido à maior facilidade de penetração do CO_2 para o seu interior. Soma-se a este fato, misturas contendo adições minerais (CCAN e CCAM) que dispõem de menores teores de CH, sendo este consumido mais rapidamente pelas reações pozolânicas do que nas misturas de REF.

5.2 COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO

Através dos resultados apresentados, confirmou-se que, com o aumento das relações a/ag houve um acréscimo nos coeficientes de carbonatação (kc) para todas as misturas

investigadas, predominando coeficientes de carbonatação (Kc) maiores para todas as misturas de CP-IV quando comparadas com as de CPII-Z, porque as primeiras possuem menor teor de clínquer, devido ao maior teor de sua substituição por cinza volante.

Os menores coeficientes de carbonatação foram das misturas de REF e menor relação a/ag, sendo estes maiores conforme aumentou esta relação. Da mesma forma ocorreu para as misturas contendo adições de CCA, onde, verificou-se que as misturas de CCAN foram inferiores para todas as relações a/ag quando comparadas com as de CCAM. Este fato pode ser creditado a menor superfície específica da CCA natural, o que diminui a sua atividade química.

Com isso conclui-se que, com o aumento da relação a/ag para as mesmas famílias de concreto, aumentaram os coeficientes de carbonatação devido ao incremento da interconectividade e permeabilidade que esta variável proporciona, gerando com isto, uma pasta menos densa e, consequentemente mais permeável, facilitando a entrada de agentes agressivos (CO_2) através da carbonatação do concreto. As CCAN apresentaram menores coeficientes do que as CCAM por serem de granulometria mais grossa.

5.3 TEOR DE CH X COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO

Os resultados mostraram que as misturas de REF apresentaram as maiores reservas alcalinas e os menores coeficientes de carbonatação em igualdade de relação a/ag quando comparadas com as demais misturas (CCAN e CCAM), comprovando-se que a incorporação de CCA nas misturas o consumo de CH é maior.

Assim ocorreu para as misturas com adição de CCA, onde verificou-se que os coeficientes de carbonatação das misturas com CCAN foram menores do que os de CCAM para os dois cimentos utilizados (CPII-Z e CP-IV) e todas as relações a/ag devido as maiores reservas de CH, salientando-se que somente para a zona não carbonatada (CH/NC) de CP-IV os teores de CH das CCAN foram menores às CCAM, porém não o suficiente para que obtivesse melhor desempenho do que as CCAN.

5.4 COEFICENTES DE CARBONATAÇÃO EM IGUALDADE DE RESISTÊNCIA

Analisando os coeficientes de carbonatação (kc) em igualdade de resistência constatou-se que a relação a/ag variou de acordo com as misturas, ficando evidente que, à medida que a resistência à compressão aumentou, reduziram-se as relações a/ag como também dos coeficientes de carbonatação para todas as misturas, o que já era esperado.
Um outro fator importante a ser considerado, foi o tipo de cimento (CPII-Z e CP-IV), o teor (15%) e tipo de CCA (CCAN e CCAM) que através de suas combinações (efeitos físicos e químicos) disponibilizaram maior ou menor conteúdo de CH remanescente, sendo os coeficientes de carbonatação influenciados pelas características de cada mistura.

As misturas de REF apresentaram os menores Kc para os dois tipos de cimentos (CPII-Z e CP-IV) sendo as de CP-IV maiores em relação as de CPII-Z para todas as resistências. Somente as de REF de CPII-Z (C25 e C30) apresentaram baixos coeficientes de carbonatação (Kc).

Para misturas com adições de CCA, verificou-se que todos os Kc das CCAN foram menores, porém relativamente próximos aos das CCAM para ambos os cimentos (CPII-Z e CP-IV) e as três resistências estudadas.

5.5 TEOR DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO EM IGUALDADE DE RESISTÊNCIA

Verificou-se que, as de maiores relação a/ag apresentaram maior porosidade e, consequentemente, maiores teores de CH devido ao maior espaço para a formação das moléculas de CH.

As maiores reservas de CH foram para as misturas de REF, sendo as de CPII-Z superiores as de CP-IV para as duas zonas de carbonatação estudadas – (CH/NC) e (CH/C) – com exceção da CCAN para a zona carbonatada (CH/C) de CPII-Z que foram superiores em relação ao de REF para as três resistências C20, C25 e C30.

Observou-se também que, quando comparados com as misturas de CCAM, os teores de CH das misturas de CCAN foram inferiores somente para as zonas não carbonatadas (CH/NC) de CP-IV para as mesmas resistências, em virtude do menor teor de CH destes últimos.

5.6 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Como sugestão para futuros estudos propõe-se a averiguação do comportamento dos dois cimentos CPIIZ e CPIV em carbonatação natural, tanto para a CCAN como CCAM, com pelo menos 3 ou 4 anos de medições da profundidade carbonatada, em ambiente abrigado, tendo como objetivo a verificação do emprego de CCAN em condições ambientais.

5.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**NBR 12655: concreto de cimento Portland: preparo, controle e recebimento procedimento.** Rio de Janeiro, 2006.

____. **NBR 5738: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR NM 67: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2008.

____. **NBR 5739: concreto: ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.

____. **NBR 7222: concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2010.

____. **NBR 8953: concreto para fins estruturais: classificação por grupos de resistência.** Rio de Janeiro, 1992.

____. **NBR 12653: materiais pozolânicos: especificação.** Rio de Janeiro. 1992.

BAKKER, R. F. M. Initiation period. In: Schiessl, P., ed. **Corrosion of steel in concrete.** Cap.3, p.22-55. London, Chapman and Hall, 1988.

BARIN, S. C. **Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento Portland Branco com altos teores de adição de escória de alto forno e ativador químico.** Santa Maria, 2008. 171 p. Dissertação (Mestrado Eng. Civil), Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2008.

BOUZOUBAÂ, N.; B. FOURNIER. **Concrete incorporating rice-husk ash; compressive strength and chloridre-ion penetrability.** Materials and technology laboratory mtl 2001 – 5, July 2001.

CADORE, W. W. **Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada.** Santa Maria, 2008. 149 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2008.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas.** Goiânia. UFG; Co-edição São Paulo: Pini, 1997.

CASTELLOTE, M., FERNANDEZ, L., ANDRADE, C., ALONSO, C. **Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated ata diferente CO_2 concentrations.** Materials and Structures. Bagneux: RILEM, v. 42, n. 4, p. 515-525, 2008.

CASTRO, A. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito a carbonatação.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goias, 2003.

CEZAR, D. S. **Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento**. 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) − Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

CHAUDHARI, D. S; JOLLANS, M. D.; CSER, F. **Understanding rice hull ash as fillers in polymers: a review.** Silicon Chemistry, vol. 1 p. 281-289, 2002.

DALLA LANA, E. F. **Carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com cinza volante cal.** Santa Maria, 2005. 138 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2005.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microssílica.** 1995. 286 f. Tese (Doutorado em Engenharia) − Escola Politécnica, Universidade de SãoPaulo, São Paulo, 1995.

DAL MOLIN, D. C. C.; ISAIA G. C. **Concreto: Ensino pesquisa e Realizações.** Ed. Geraldo C. Isaia – São Paulo: IBRACON, 2005 2V, 1600p.

DUART. M. A. **Estudo da Microestrutura do Concreto com Adição de Cinza de Casca de Arroz Residual sem Beneficiamento.** 134p. Dissertação de mestrado, Gepecon. Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

FATTUHI, N. F. **Carbonation of concrete as affected by mix constituints and initial water curing period.** Matériaux et Constructions VOL 19 – Nº 110 – 2002.

FIGUEIREDO, E. J. P.; HELENE, P. R.; ANDRADE C.; **Fatores determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura do concreto.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo BT/PCC/121. São Paulo, 1993.

FRIZZO, B. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade de oxigênio e na absorção capilar do concreto.** 2001. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

GASTALDINI, A. L. G.; **Influência das adições minerais na porosidade da pastas de cimento Portland.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4. 1996, São Paulo. Anais Porto Alegre: ABCP, 1996, 3v, v.1, p. 119-136.

HELENE, P. R. L.; MITIDIERI, C. V.; THOMAS, E. **Influência do tipo de cimento e da relação a/c na carbonatação do concreto: estimativa da vida útil do projeto.** São Paulo, 1995. Publicação IBRACON 95dur011.

HELENE, P.; VIEIRA, J.O.; ANDRADE, T.; DELGADO, C.; JUST, A. **Influência da relação água /cimento e abatimento na carbonatação do concreto.** 1999. Publicação IBRACON 1999.

HOPPE, A. **Carbonatação em concreto com cinza de casca de arroz sem moagem.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

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

HOUSTON, D. F. **Rice hulls. Rice chemistry and technology**. Am. Ass. Cereal Chem. Ins. St Paul Minesota, USA p 301-350, 1972.

ISAIA, G. C. **Discussão sobre o desempenho de concreto de alta resistência com cinza volante.** Revista IBRACON, São Paulo, v. II, n.4, p. 80-84, 1992.

IRGA. **Instituto Rio-Grandense do Arroz.** Dados de Safra 2012/2013. Disponível em: http:// www.irga.rs.gov.br. Acesso em 10/11/2014.

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. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) − Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L. **Concreto "verde" com teores muito elevados de adições minerais: um estudo de sustentabilidade.** I Conferência Latino Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído 18-21 Julho de 2004, São Paulo.

ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M.; GASTALDINI, A. **Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43. 2001, Foz de Iguaçu. Anais.São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001.

ISAIA, G.C. **Carbonatação do concreto: uma revisão.** 41 p. Santa Maria, março 1999. Polígrafo.

ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M. A.O.; GASTALDINI, A. L. **Efeito de misturas pozolânicas sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland.** In: Congresso Brasileiro do Concreto, 40º, Rio de Janeiro, 1998. São Paulo. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto.

ISAIA, G. C., GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. C. **The physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete.** In: Sustainable Construction into the Next Millenium Environmentally- Fryendly and Innovative Cement Based Materials, 2000, João Pessoa. Proceedings of the International Conference on Sustainable Construction into the Next Millenium, João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2000. V.1, p. 229-244.

JAMES, J. J.; RAO, M. S. **Reactivity of rice husk ash.** Cement of concrete Research 16, vol. 16, p. 296-302, 1986.

KAZMIERCZAK, C. S.; HELENE, P. R. L. **Análise e fatores que influenciam a velocidade de carbonatação em estruturas de concreto armado.** IBRACON – Reunião Anual. Brasília, 1993. Controle de Qualidade do Concreto. Processos construtivos em obras de Concreto. Publicação IBRACON 1993.

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

KILINÇKALE, F. M.; **The effect of $MgSO_4$ and HCl solutions of the strength and durability of pozzolan cement mortars.** Cement and Concrete Research, vol. 27 nº 12 p.1911-1918. 1997.
KHUNTHONGKEAW, J.; TANGTERMSIRIKUL, S.; LEELAWAT, T. **A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete.** Construction and Building Materials, v. 20, p .744 – 753, 2006.

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

KOBUKU, M., NAGATAKI, S. **Carbonation of concrete with fly ash and corrosion of reinforcement in 20 years test.** In: MALHOTRA, V. M (ed.) International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 3rd, Trondheim, 1989. Proceedings… Detroit: American Concrete Institute, 1989, 2 v., v. 1, p. 315-329 (SP-114).

MARTINELLI. L. A. **Carbonatação Natural de Protótipos de Concreto com Cinza de Casca de Arroz.** 124p. Dissertação de mestrado. Gepecon. Universidade Federal de Santa Maria, 2010.

MASSAZZA, F. **Pozzolana and pozzolanic cements.** In: HEWLWTT, P. C. (ed.). Lea's Chemistry of Cement and Concrete. London: Arnold, 1998, p. 471-632.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 674 p. São Paulo: IBRACON, 2008.
MEIRA, L. **Propriedades mecânicas e retração do concreto com cinza de casca de arroz natural, sem beneficiamento de moagem.** 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

NAGATAKI, S.; OHGA, H.; KIM, E. K. **Effect of curing conditions on the carbonation of concrete with fly ash and the corrosion of reinforcement in long-term tests.** ACI. Proceedings 1991.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** Tradução Salvador E. Giamusso. 2 ed. 806p. São Paulo: Pini, 1997.

OHGA, H.; NAGATAKI, S. **Prediction of carbonation depht of concrete with fly ash.** In: Malhotra, V. M. (ed) International Conference on fly ash, silica fuime, slag and natural pozzolans in concrete, 3rd, Trondheim, 1989. Proceedings. American Concrete Institute, Deteroit, 1989, 2v, v.2, p. 275-294 (SP-114).
OLLIVIER, J. P. **Durability of concrete.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, Boletim Técnico, 1998.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. **Reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation.** Journal of the American Institute of Chemical Engineers, V.35, n.10, 1989.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. **Fundamental concrete carbonation model and application to durability of reinforced concrete.** In: DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, p. 27-38 Brighton. Proceedings. London, 1991.

PAPADAKIS, V.G.; FARDIS, M.N.; VAYENAS, C.G. **Hydration and carbonation of pozzolanic cements.** ACI Materials Journal, v.89, n.2, p.119-130, Mar.Apr.1992.

PAPADAKIS, V. G.; TSIMAS, S. A. **Supplementary cementing materials in concrete part II: a fundamental estimation of efficiency factor.** Cement and Concrete Research. Vol. 32 p. 1533-1538, 2002.

PARROT, L. J. **Some effects of cement and curing upon carbonation and reinforcement corrosion in concrete.** Materials and Structures, v.29, n.187, p. 164-173, April 1996.

PARROT, L. J. **Carbonation of concrete: a review.** 40p. London: Cement and Concrete Association, Building Research Station, 1987.

PARROT, L. J. C **Mouisture conditioning and transport properties of concrete test especimens.** Materials and Structures, vol.24 p. 460 – 468, 1994.

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

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição.** Tese de Doutorado em co-tutela (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2009.

PEDROZO, E. C. **Estudo da cinza da casca do arroz residual em concretos estruturais: uma análise da durabilidade aos cloretos.** 2008. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado.** 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

PRUDÊNCIO, J. R.; SANTOS, S. **Influência do grau de moagem na pozolanicidade da cinza da casca de arroz.** In: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. Anais. São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1996. p. 46-52.

REGO, J. H. S.; NEPOMUCENO, A. A.; FIGUEIREDO, E. J. P.; VIEIRA, F. L. **Análise da microestrutura e da estrutura porosa de pastas de cimento compostas com cinzas da cascas de arroz (cca's) amorfa e cristalina.** 48º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON 2006. Anais.

REGO, J. H. S.; FIGUEIREDO, E. J. P; NEPOMUCENO, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz residual (cca residual) como adição mineral ao cimento em concretos.** 44º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON 2002.

RILEM. **Recomendations of TC 116-PCD. Tests for gas permeability of concrete**. Revista Materials and Structures. V.32, n. 217, p. 163-179, Abril 1999.

RILEM. **Measurement of hardened concrete carbonation depth CPC-18.** Revista Materials and Structures. V. 17, nº 102. 1988.

RODRIGUEZ DE SENZALE, G.; DALMOLIN, D. C. C. **Study of influence of rice-husk ash on compressive strength of concrete at different ages.** In: CANMET/ACI, 6, 1998, Bangkok. Proceeding... Bangkok: American Concrete Institute, 1998. p. 213-230 (SP-186-13).

ROY, S.K.; BENG, P.K.; NORTHWOOD, D.O. **The carbonation of concrete structures in the tropical environment of Singapore and a comparision with published data for temperate climates.** Magazine of Concrete Research.1993.

SENSALE, G. R. **Strength development of concrete with rice-husk ash.** Cement and Concrete Composites, v.28, p. 158-160, 2006.

SILVEIRA, A. A. **A utilização da cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos.** 1996. 139 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SMOLCZYK, H.G. In: **The International Symposiumon the Chemistry of Cement V.** Tokyo, 1969. Proceedings…Tokyo, 1969, Part III, v. II/4, p.369-384.

SOUZA, F. X. **Casca de Arroz carbonizada: um substrato para a propagação de plantas. Revista Lavoura Arrozeira.** Porto Alegre: IRGA, v. 46, n. 406, 1993, p. 11.

SPERB, J. E. K. **Carbonatação e absorção capilar de concretos com adições minerais e ativadores químicos.** Dissertação (Mestrado Eng. Civil) – Universidade Federal de Santa Maria – 2003.

STUMPP, M. J. **Carbonatação do concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada.** Dissertação (Mestrado Eng. Civil) – Universidade Federal de Santa Maria – 2003.

TASCA, M. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura.** Santa Maria, 2012. 179p. Dissertação (Mestrado Eng. Civil), Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2012.

TASHIMA, M. M.; SILVA, C. A. R.; AKASAKI, J. L. **The possibility of adding the rice husk ash (RHA) to the concrete.** In: CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN THE BUILDING AND STRUCTURES, 2004, Barcelona, Espanha. Anais... Barcelona, 2004. p. 778-786.
TULA, L. S. **Contribuição ao estudo da resistência à corrosão de armaduras de aço inoxidável.** São Paulo, 2000. 259p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

UOMOTO, T.; TAKADA, Y. **Factors affecting concrete carbonation rate.** In: durability of building materials and components, 6th. Anais. Tomosawa, 1993.

VAGHETTI, M. A. O. **Efeitos da Cinza Volante com Cinza de Casca de Arroz ou Sílica Ativa Sobre a Carbonatação do Concreto de Cimento Portland.** Dissertação de mestrado. 118 f.. Universidade Federal de Santa Maria, 1999.

VAGUETTI, M. A. O. **Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais.** Porto Alegre, 2005, 286p. Tese (Doutorado) – Universidade do Rio Grande do Sul. 2005.

VAN, BALEN K.; VAN GEMERT, D. **Modelling lime mortar carbonation.** Materials and Structures, vol. 27, p. 393 – 398, 1994.

VENQUIARUTO, S. D. **A influência da finura e do teor de adições minerais na carbonatação do concreto.** Santa Maria, 122p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2002.

WADA, I.; KAWANO, T.; KAWAKAMI, M. **Reactive rice husk ash on durability of concrete of mortar.** In: MALHOTRA, V. M. (ed). CANMET/ACI. International Conference on Durability of Concrete, 5th, Barcelona 2000. Proceedings. American Concrete Institute, 2v. v.1, p. 205-233 (SP-192-13).

ZERBINO, R., GIACCIO, G., ISAIA, G. **Concrete incorporating rice husk ahs without processing.** Constructions and Building Materials. V. 25, p. 371-378, 2011.