



UFSM

Dissertação de Mestrado

CARBONATAÇÃO DA CAMADA DE COBRIMENTO DE  
PROTÓTIPOS DE CONCRETO COM CINZA VOLANTE E  
CAL

---

Elinor Fernando Dalla Lana

PPGEC

Santa Maria, RS, Brasil

2005

**CARBONATAÇÃO DA CAMADA DE COBRIMENTO DE  
PROTÓTIPOS DE CONCRETO COM CINZA VOLANTE  
E CAL**

---

por

**Elinor Fernando Dalla Lana**

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**

**PPGEC**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2005**

**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 DA CAMADA DE COBRIMENTO DE  
PROTÓTIPOS DE CONCRETO COM CINZA VOLANTE E CAL**

elaborada por

***Elinor Fernando Dalla Lana***

como requisito parcial para obtenção do grau de

***Mestre em Engenharia Civil***

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

**Prof. Dr. Eng. Geraldo Cechella Isaia - UFSM**  
*(Presidente/Orientador)*

---

**Prof. Dr. Arq. Antônio Luiz Guerra Gastaldini - UFSM**

---

**Prof. Dra. Eng. Denise Carpena Coitinho Dal Molin - UFRGS**

Santa Maria, março de 2005

Não importa saber se a gente acredita em Deus:  
O importante é saber se Deus acredita na gente...

(Mario Quintana)

## *AGRADECIMENTOS*

Para realização desta dissertação, não bastou apenas dedicação e esforço pessoal, foi necessário o auxílio das pessoas que nos cercam. Cabe-nos agradecer as pessoas e entidades que de maneira direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho:

A instituição Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade da realização desta dissertação e pela cessão das instalações do Laboratório de Materiais de Construção Civil.

Ao professor Dr. Geraldo Cechella Isaia, pela orientação, por não medir esforços para ajudar, pela objetividade e clareza na transmissão de seus conhecimentos;

Ao professor Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini, pelo conhecimento transmitido e pela disposição no esclarecimento de dúvidas.

Aos colegas Bianca Moreira, Fabiano Missau, Régis Moraes, Rodrigo Silveira e Simone Petry pelo companheirismo na árdua tarefa da investigação experimental.

Aos alunos bolsistas do Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON / UFSM) e aos funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC / UFSM), pela atenção e ajuda;

À minha família pelo incentivo e afeto demonstrados ao longo desta pesquisa.

A todos que colaboraram para a realização desta pesquisa.

Muito obrigado a todos!

# SUMARIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>V</b>
<b>SUMARIO</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTA DE ANEXOS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>XVI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XVIII</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	4
<b>DESCRIÇÃO E MECANISMOS DA CARBONATAÇÃO</b> .....	<b>6</b>
1.1 - RELAÇÃO ENTRE A DURABILIDADE DO CONCRETO E A CARBONATAÇÃO .....	6
1.2 - CARBONATAÇÃO DO CONCRETO .....	7
2.2.1 - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO.....	9
1.3 - VARIÁVEIS QUE INFLUEM NA CARBONATAÇÃO .....	10
2.3.1 RELAÇÃO ÁGUA / MATERIAIS CIMENTÍCIOS .....	10
2.3.2 POROSIDADE DA PASTA DO CONCRETO .....	13
2.3.3 DOSAGEM DO CIMENTO E AS ADIÇÕES MINERAIS.....	14
2.3.4 PROCESSOS DE CURA.....	16
2.3.5 AGRESSIVIDADE AMBIENTAL.....	17
2.3.6 CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> .....	20
2.3.7 SATURAÇÃO DOS POROS .....	22
2.3.8 TEOR DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO REMANESCENTE .....	23
2.3.9 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	24
<b>INFLUÊNCIA DAS POZOLANAS E DA CAL NA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO</b> .....	<b>28</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	28
3.2 CINZA VOLANTE .....	29
3.3 CAL HIDRATADA.....	32
3.3.1 PROPRIEDADES DA CAL HIDRATADA.....	32
3.3.2 A CAL NO CONCRETO .....	35
3.3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	38
<b>DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS</b> .....	<b>40</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	40
4.2 OBJETIVOS .....	41
4.3 VARIÁVEIS ESTUDADAS .....	41
4.4 MATERIAIS UTILIZADOS .....	42
4.4.1 MATERIAIS CIMENTÍCIOS .....	43

4.4.2	AGREGADOS.....	45
4.4.3	ADITIVO QUÍMICO .....	47
4.5	DOSAGEM DO CONCRETO.....	47
4.5.1	NOMENCLATURA UTILIZADA.....	48
4.6	MOLDAGEM DOS PROTÓTIPOS.....	49
4.7	ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA .....	53
4.7.1	INTRODUÇÃO.....	53
4.7.2	PRÉ-CONDICIONAMENTO.....	55
4.7.3	CÂMARA DE CARBONATAÇÃO.....	60
4.7.4	DETERMINAÇÃO DAS PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO .....	63
4.7.5	ENSAIO DO TEOR DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO REMANESCENTE.....	67
	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>70</b>
5.1	INTRODUÇÃO.....	70
5.2	ESTRUTURA DOS POROS DA CAMADA DE COBRIMENTO.....	71
5.3	COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO .....	74
5.3.1	- COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO POR CAMADAS .....	77
5.4	COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO X HIDROXIDO DE CÁLCIO REMANESCENTE.....	79
5.4.1	TRAÇOS R40xR75.....	79
5.4.2	TRAÇOS CV40xCV75.....	80
5.4.3	TRAÇOS CV40CxCV75C.....	80
5.4.4	TRAÇOS CV40xCV40C.....	82
5.4.5	TRAÇOS CV75xCV75C.....	82
5.5	COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO X ÁGUA COMBINADA.....	84
5.5.1	TRAÇOS R40xR75.....	84
5.5.2	TRAÇOS CV40xCV75.....	84
5.5.3	TRAÇOS CV40CxCV75C.....	85
5.5.4	TRAÇOS CV40xCV40C.....	87
5.5.5	TRAÇOS CV75xCV75C.....	87
5.6	COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO X $\varnothing < 10$ NM.....	88
5.6.1	TRAÇOS R40xR75.....	89
5.6.2	TRAÇOS CV40xCV75.....	89
5.6.3	TRAÇOS CV40CxCV75C.....	90
5.6.4	TRAÇOS CV40xCV40C.....	93
5.6.5	TRAÇOS CV75xCV75C.....	93
5.7	ANÁLISE POR TRAÇOS .....	94
5.7.1	TRAÇOS R40xCV40.....	94
5.7.2	TRAÇOS R75xCV75.....	95
5.7.3	TRAÇOS R40xCV40C.....	97
5.7.4	TRAÇOS R75xCV75C.....	98
5.7.5	TRAÇOS CV40xCV40C.....	99
5.7.6	TRAÇOS CV75xCV75C.....	100
5.8	CORRELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO E AS VARIÁVEIS EM ESTUDO .....	101
5.9	CORRELAÇÃO ENTRE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO REMANESCENTE E AS VARIÁVEIS EM ESTUDO .....	103
	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>104</b>
6.1	INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS E DA CAL NA CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS .....	104
6.2	COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO X HIDROXIDO DE CÁLCIO REMANSCENTE.....	105
6.3	COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO X ÁGUA COMBINADA.....	106
6.4	COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO X $\varnothing < 10$ NM.....	107
6.5	RELACIONAMENTO ENTRE TRAÇOS.....	108
6.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	110
6.7	PROPOSTAS PARA NOVOS ESTUDOS.....	111

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>112</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>120</b>



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL.....	18
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DO CIMENTO .....	44
TABELA 3 – TEOR DE ARGAMASSA EM MASSA E EM VOLUME DOS TRAÇOS EMPREGADOS.....	48
TABELA 4 – QUANTIDADE DE MATERIAIS POR M <sup>3</sup> DE CONCRETO.....	49
TABELA 5 – RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO – 91 DIAS.....	71
TABELA 6 – DISTRIBUIÇÃO DOS POROS POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO AOS 91 DIAS. ....	72
TABELA 7 – DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE CARBONATADA.....	75
TABELA 8 – RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO, HIDRÓXIDO DE CÁLCIO, ÁGUA COMBINADA E DIÂMETRO DOS POROS PARA AS TRÊS PROFUNDIDADES.....	76
TABELA 9 – CORRELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO E AS DEMAIS VARIÁVEIS.....	102
TABELA 10 – CORRELAÇÃO ENTRE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO REMANESCENTE E AS DEMAIS VARIÁVEIS	103

## *LISTA DE QUADROS*

QUADRO 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AGLOMERANTES E POZOLANAS.....	45
QUADRO 2 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS AGREGADOS .....	46

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO X RELAÇÃO A/MC (HELENE ET AL 1999).....	11
FIGURA 2 – RELAÇÃO ENTRE PROFUNDIDADES CARBONATADAS E RELAÇÃO A/MC, (KOKUBU & NAGATAKI, 1989).....	12
FIGURA 3 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO APÓS 6 ANOS DE EXPOSIÇÃO A 20°C E 50% UR (SKOJOSVOLD, 1986).....	12
FIGURA 4 – CORRELAÇÃO ENTRE A POROSIDADE ABERTA E A PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO AOS 2 ANOS DE IDADE (ALMEIDA, 1991).....	13
FIGURA 5 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO EM FUNÇÃO DO RAIOS DOS POROS ABERTOS (OPC – CIMENTO PORTLAND COMUM, PBFSC – CIMENTO PORTLAND COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO) - (BIER, KROPP & HILSDORF 1989).....	14
FIGURA 6 – EFEITO DO TEOR DE ADIÇÕES DE CINZA VOLANTE NO COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO EM ARGAMASSAS CURADAS EM ÁGUA DESTILADA (NAGATAKI & OHGA 1992).....	16
FIGURA 7 – EFEITO DO PERÍODO DE CURA EM ÁGUA DESTILADA (NAGATAKI & OHGA, 1992).....	17
FIGURA 8 – CONCRETOS EM AMBIENTES EXTERNOS E INTERNOS, COM 0% E 30% DE CINZA VOLANTE E CONSUMO DE CIMENTO + CV DE 250 E 330 KG/M <sup>3</sup> (NAGATAKI, OHGA & KIM 1991).....	19
FIGURA 9 – PROFUNDIDADE CARBONATADA COMO FUNÇÃO DA UMIDADE RELATIVA (VENUAT APUD ROSENBERG, 1989).....	22
FIGURA 10 – CORRELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO NATURAL E O TEOR DE HÍDRÓXIDO DE CÁLCIO REMANESCENTE PARA NÍVEL DE RESISTÊNCIA DE 70 MPa (ISAIA, VAGUETTI & GASTALDINI, 1998).....	24
FIGURA 11 – RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E A PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO (NAGATAKI, OHGA & KIM, 1991).....	25
FIGURA 12 – CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL E O COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO PARA CV (VENQUIARUTTO, 2002).....	26
FIGURA 13 – CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL E O COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO PARA CCA (VENQUIARUTTO, 2002).....	27
FIGURA 14 – RELAÇÃO ENTRE A COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS E A RETENÇÃO DE ÁGUA (BOYTON & GUTSCHICK APUD GUIMARÃES, 1997).....	34
FIGURA 15 – PROFUNDIDADES CARBONATADAS EM CONCRETOS COM ADIÇÃO DE CAL (MIRA, PAPADAKIS & TSIMAS, 2001).....	37
FIGURA 16 – FORMAS UTILIZADAS NA MOLDAGEM DOS PROTÓTIPOS.....	50
FIGURA 17 – PREPARAÇÃO DAS FORMAS PARA MOLDAGEM.....	51
FIGURA 18 – PROTÓTIPOS SENDO VIBRADOS.....	52
FIGURA 19 – CURA EM SACOS DE ANIAGEM.....	52
FIGURA 20 – CURA DOS PROTÓTIPOS AO AR LIVRE.....	53
FIGURA 21 – DIMENSÕES DOS PROTÓTIPOS.....	54
FIGURA 22 – EXTRAÇÃO DE CORPOS-DE-PROVA DOS PROTÓTIPOS.....	54
FIGURA 23 – CORTE DOS CORPOS-DE-PROVA.....	55
FIGURA 24 – ESQUEMA DE CORTE DOS CORPOS-DE-PROVA (UNIDADE: CM).....	55
FIGURA 25 – APLICAÇÃO DE VERNIZ NA LATERAL E NA FACE INFERIOR.....	57
FIGURA 26 – PRÉ-CONDICIONAMENTO.....	57
FIGURA 27 – ESTUFA PARA PRÉ-SECAGEM.....	58
FIGURA 28 – EMBALAGEM EM FILME DE POLIETILENO.....	59
FIGURA 29 – EMBALAGEM EM SACO DE POLIETILENO E ALUMÍNIO.....	59
FIGURA 30 – ESTUFA A 50°C PARA REDISTRIBUIÇÃO DA UMIDADE.....	60
FIGURA 31 – CÂMARA CLIMÁTICA AUTOMATIZADA.....	61
FIGURA 32 – DISTRIBUIÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA NA CÂMARA CLIMATIZADA.....	63
FIGURA 33 – PRENSA PARA RUPTURA DOS CORPOS-DE-PROVA.....	64
FIGURA 34 – RUPTURA DOS CORPOS-DE-PROVA.....	64
FIGURA 35 – CORPO-DE-PROVA APÓS ASPERSÃO DE FENOLFTALEÍNA.....	65
FIGURA 36 – MEDIDAS COM PAQUÍMETRO ELETRÔNICO.....	65
FIGURA 37 – MEDIDAS DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO.....	66
FIGURA 38 – MARCAÇÃO DAS PROFUNDIDADES A SEREM ESTUDADAS.....	67

FIGURA 39 – COLETA DE PÓ COM FURADEIRA DE PRECISÃO .....	68
FIGURA 40 – PÓ PENEIRADO NA PENEIRA DE MALHA #200 .....	68
FIGURA 41 – SECAGEM DAS AMOSTRAS EM ESTUFA À 60°C .....	69
FIGURA 42 – EXEMPLO DA OBTENÇÃO DO COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO .....	74
FIGURA 43 – COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO X CAMADAS – TRAÇOS DE REFERENCIA .....	78
FIGURA 44 – COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO X CAMADAS – TRAÇOS COM CINZA VOLANTE.....	78
FIGURA 45 – COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO X CAMADA – TRAÇOS COM CINZA VOLANTE E CAL ....	78
FIGURA 46 – COMPARAÇÃO R40XR75 – HIDRÓXIDO DE CÁLCIO.....	81
FIGURA 47 - COMPARAÇÃO CV40XCV75 - HIDRÓXIDO DE CÁLCIO.....	81
FIGURA 48 - COMPARAÇÃO CV40CXCV75C - HIDRÓXIDO DE CÁLCIO .....	81
FIGURA 49 - COMPARAÇÃO CV40XCV40C - HIDRÓXIDO DE CÁLCIO .....	83
FIGURA 50 - COMPARAÇÃO CV75XCV75C - HIDRÓXIDO DE CÁLCIO.....	83
FIGURA 51 – COMPARAÇÃO R40XR75 – ÁGUA COMBINADA .....	86
FIGURA 52 - COMPARAÇÃO CV40XCV75 – ÁGUA COMBINADA .....	86
FIGURA 53 - COMPARAÇÃO CV40CXCV75C – ÁGUA COMBINADA .....	86
FIGURA 54 - COMPARAÇÃO CV40XCV40C – ÁGUA COMBINADA .....	88
FIGURA 55 - COMPARAÇÃO CV75XCV75C – ÁGUA COMBINADA .....	88
FIGURA 56 - COMPARAÇÃO R40XR75 – DIÂMETRO DOS POROS.....	92
FIGURA 57 - COMPARAÇÃO CV40XCV75 – DIÂMETRO DOS POROS .....	92
FIGURA 58 - COMPARAÇÃO CV40CXCV75C – DIÂMETRO DOS POROS .....	92
FIGURA 59 - COMPARAÇÃO CV40XCV40C – DIÂMETRO DOS POROS .....	94
FIGURA 60 - COMPARAÇÃO CV75XCV75C – DIÂMETRO DOS POROS .....	94
FIGURA 61 – CRUZAMENTO DOS TRAÇOS R0XCV40.....	97
FIGURA 62 – CRUZAMENTO DOS TRAÇOS R75XCV75.....	97
FIGURA 63 – CRUZAMENTO DOS TRAÇOS R40XCV40C .....	99
FIGURA 64 – CRUZAMENTO DOS TRAÇOS R75XCV75C .....	99
FIGURA 65 – CRUZAMENTO DOS TRAÇOS CV40XCV40C .....	101
FIGURA 66 – CRUZAMENTO DOS TRAÇOS CV75XCV75C .....	101

## *LISTA DE ANEXOS*

ANEXO 1 – ROTINA “COTA.LSP” PARA O DIMENSIONAMENTO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO.....	120
---	-----

## *LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS*

- °C** - Graus centígrados
- ∅** - diâmetro
- #** - abertura malha peneira
- Å** - Angstroms
- a/ag** - relação água aglomerante em massa
- a/mc** - relação água materiais cimentícios em massa
- ABCP** - Associação Brasileira de Cimento Portland
- ARI** - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
- ASTM** - American Standart for Testing Materials
- C<sub>3</sub>S** - silicato tricálcio
- CaCO<sub>3</sub>** - Carbonato de cálcio
- CaO** - óxido de cálcio
- Ca(OH)<sub>2</sub>** - Hidróxido de cálcio
- Cal/mol.gr** - caloria por mol .grama
- CaSO<sub>4</sub>** - Sulfato de cálcio
- CCA** - Cinza de casca de arroz
- CH** - Hidróxido de cálcio
- cm** - centímetros
- CO<sub>2</sub>** - Anidrido carbônico ou dióxido de carbono
- CP** - Cimento Portland
- CPP** - Cimento Portland Pozolânico
- C-S-H** - Silicato de cálcio hidratado
- CV** - Cinza Volante
- E** - escória de alto forno
- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** - óxido de ferro
- g** - grama
- g/cm<sup>3</sup>** - grama por centímetro cúbico, medida de massa específica
- g/m<sup>2</sup>** - gramas por metro quadrado, medida de absorção capilar
- H<sub>2</sub>O** - molécula da água
- H<sub>2</sub>S** - gás sulfídrico
- K<sup>+</sup>** - íons potássio
- Kc** - Coeficiente de carbonatação

- Kg** - Quilograma
- Kg/dm<sup>3</sup>** - Quilograma por decímetro cúbico, massa específica
- Kg/m<sup>3</sup>** - Quilograma por metro cúbico, massa específica
- KOH** - hidróxido de potássio
- KO<sub>2</sub>** - coeficiente de permeabilidade ao oxigênio
- L.M.C.C** - Laboratório de Materiais de Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria
- m<sup>3</sup>** - metro cúbico
- MgO** - óxido de magnésio
- Mg(OH)<sub>2</sub>** - hidróxido de magnésio
- m<sup>2</sup>/Kg** - metro quadrado por Quilograma, indica superfície específica
- mm** - milímetro
- mm/sem<sup>0.5</sup>** - milímetros por raiz de semana, medida de coeficiente de carbonatação
- MPa** - Mega Pascal
- Na<sup>+</sup>** - íons sódio
- NaOH** - hidróxido de sódio
- NBR** - Norma Brasileira
- NM** - Norma do Mercosul
- nm** - nanometros
- O<sub>2</sub>** - Oxigênio
- OH<sup>-</sup>** - íons Hidroxila
- pH** - potencial hidrogênio
- POZ** - Cimento Portland Pozolânico
- r<sup>2</sup>** - coeficiente de correlação estatística
- REF** - mistura de referência, 100% de Cimento Portland
- RILEM** - Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et des Recherches sur les Matériau et les Constructions
- SA** - Sílica ativa, micro sílica
- sem** - semanas
- SiO<sub>2</sub>** - Dióxido de silício
- U.F.S.M.** - Universidade Federal de Santa Maria
- UR** - Umidade relativa do ar em %

# *RESUMO*

Dissertação de Mestrado

Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil

Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

## **CARBONATAÇÃO DA CAMADA DE COBRIMENTO DE PROTÓTIPOS DE CONCRETO COM CINZA VOLANTE E CAL**

**Autor: Elinor Fernando Dalla Lana**

**Orientador: Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia**

**Santa Maria, março de 2005.**

Quando se observa o concreto armado do ponto de vista da durabilidade, percebe-se uma zona heterogênea a partir das fôrmas, conhecida como camada de cobrimento que possui características distintas das zonas mais profundas das peças estruturais. É através da mesma que atuam os mecanismos de transporte que permitem a interação com o meio ambiente através do fluxo de fluidos que percolam pelos poros. Entre as propriedades, que mais são afetadas a partir desta camada, está a carbonatação, principalmente quando se utiliza altos teores de adições minerais, especialmente pozolanas, que consomem o hidróxido de cálcio da reserva alcalina e aceleram o processo de neutralização. Quando a profundidade carbonatada atinge a armadura, esta sofre processo de despassivação pela queda do pH e fica disponível para o início da corrosão, caso as condições ambientais forem propícias. As pozolanas, em especial a cinza volante, além das vantagens ecológicas que traz o seu emprego em concreto, produzem alterações significativas na melhoria da microestrutura da pasta mas, em contrapartida, consome grande parte de CH, acelerando o processo de carbonatação.

A presente investigação trata do estudo de protótipos de concreto curados em condições ambientais, de onde foram extraídos testemunhos a partir da superfície do concreto e, após, a 2,5 e 5,0 cm de profundidade, com o intuito de estudar a influência da distância à superfície externa sobre o processo de carbonatação, pH e CH. Foram empregadas misturas com cimento Portland (referência) e com sua substituição, em massa, por 50% de cinza volante, com e sem adição de cal hidratada. Empregou-se câmara climatizada para realizar os ensaios de carbonatação acelerada, determinando-se as profundidades neutralizadas em 4, 8 e 12 semanas.



A partir destes dados foram calculados os coeficientes de carbonatação, de onde pode-se concluir que a substituição de cimento por 50% de cinza volante aumentou, em média, em 100% a velocidade da carbonatação, enquanto que a adição de 20% de cal a estes traços fez com que o acréscimo médio baixasse para 20%, em média. Também pode-se concluir que a camada 3, a 50 mm da superfície, foi a que mais se beneficiou com a adição de cal em relação ao concreto de referência pois apresentou coeficiente de carbonatação de apenas 40% superior, teor de CH 5,8% mais alto, teor de água combinada 4% maior e, finalmente, teor de poros menores de 10 nm 10,6% mais elevados.

# **ABSTRACT**

Dissertação de Mestrado

Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil

Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

## **CARBONATAÇÃO DA CAMADA DE COBRIMENTO DE PROTÓTIPOS DE CONCRETO COM CINZA VOLANTE E CAL**

(CARBONATION OF COVER CONCRETE OF PROTOTYPE WITH  
FLY ASH AND LIME)

**Author: Elinor Fernando Dalla Lana**

**Coordinator: Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia**

**Santa Maria, march, 2005.**

When the armed concrete of the point of view of the durability is observed, observes heterogeneous zone from mold, known as cover concrete that possess distinct characteristics of the zones deepest of the structural parts. It is through the same one that the transport mechanisms act that allow the interaction with the environment through the fluid flow that stream for the pores. Between the properties, that more are affected to leave of this layer, it is the carbonation, mainly when one uses high texts of mineral additions, especially pozzolans, that consume the calcium hydroxide of the alkaline reserve and speed up the neutralization process. When the carbonated depth reaches the armor, this suffers process from depassivation for the fall of pH and is available for the beginning of the corrosion, case the ambient conditions will be propitious. The pozzolans, in special the fly ash, beyond the ecological advantages that its job in concrete brings, produce significant alterations in the improvement of the microstructure of the folder but, on the other hand, it consumes great part of CH, speeding up the carbonation process.

The present inquiry deals with the study of cured archetypes of concrete in ambient conditions, of where had been extracted certifications from the surface of the concrete and, after, the 2,5 and 5,0 cm of depth, with intention to study the influence of the distance to the external surface on the process of carbonatação, pH and CH. Mixtures with cement Portland (reference) and its substitution had been used, in mass, for 50% of fly ash, with and without addition of hydrated lime. Climatized chamber was used to carry through the assays of sped up carbonation, determining the depths neutralized in 4, 8 and 12 weeks.

To leave of these data the carbonatação coefficients had been calculated, of where it can be concluded that the cement substitution for 50% of fly ash increased, in average, in 100% the speed of the carbonation, while that the addition of 20% of lime to these traces made with that increase it to me average lowered for 20%, in average. Also it can be concluded that layer 3, 50 mm of the surface, was the one that more was benefited with the addition of lime in relation to the reference concrete therefore presented coefficient of carbonation of only 40% greater, content of higher CH 5.8%, agreed water content 4% greater and, finally, text of 10 lesser pores of nm raised 10.6% more.

# **INTRODUÇÃO**

## **1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA**

Esta pesquisa teve origem em um trabalho desenvolvido pelo Grupo de Estudos e Pesquisa em Concreto (GEPECON) da UFSM, que estuda a camada de cobrimento do concreto, devido ao entendimento de que esta camada possui uma microestrutura diferente daquela do interior da peça estrutural e, através de um adequado conhecimento da mesma, pode-se retardar ou eliminar a deterioração precoce do concreto por ataque de agentes deletérios.

A adição de pozolanas, principalmente aquelas oriundas de subprodutos industriais, tem sido tema de muitos trabalhos que visam sua utilização para melhorar tanto a resistência mecânica, quanto à durabilidade de concretos e argamassas (Silveira et al., 1996).

Um dos maiores desafios que a tecnologia atual se depara é definir um destino para esses resíduos, tendo em vista a quantidade produzida e a possibilidade do seu emprego em escala industrial.

Como grande parte deste resíduo possui atividade pozolânica, isto é, são de origem silicosa e mineralogicamente amorfos, apresentando reatividade com a cal, a indústria da construção civil é a mais indicada para consumi-los em produtos derivados do cimento Portland. Tendo em vista que o cimento Portland é um dos materiais mais empregados pelo homem, a perspectiva de consumo destes resíduos é uma contribuição que a Engenharia Civil oferece à sociedade com o objetivo de preservar o meio ambiente e, ao mesmo tempo, produzir construções mais duráveis e com menor custo econômico e social. Além das vantagens técnicas que são obtidas pelo uso de pozolanas no concreto com cimento Portland, é um modo seguro e barato de removê-los da superfície do solo, contribuindo para a conservação de energia (menor consumo de cimento) e de recursos minerais (calcário e argila) cuja exploração geralmente agride o meio ambiente (Isaía, 1999).

Isaía (1995) confirma trabalhos realizados por outros pesquisadores, onde afirma que a extração mineral de argila e calcário para a obtenção de cimento geram impactos ambientais de considerável vulto, assim como a industrialização do cimento, que com elevadas temperaturas de queima gera aproximadamente 50 Kg de CO<sub>2</sub> para cada saco de 50 Kg de cimento.

A indústria do cimento é a principal fonte geradora de CO<sub>2</sub> entre as indústrias e esta quantidade de gás carbônico contribui para o aumento do efeito estufa.

Observa-se portanto que a utilização destas adições, em substituição ao cimento, minimiza dois impactos ambientais: a emissão de gases poluentes durante a produção do cimento, e a deposição final dos rejeitos.

Além dos benefícios ambientais, as adições minerais podem trazer também um menor custo do concreto, além de, na maioria dos casos, gerarem um aumento significativo da sua durabilidade.

Segundo Sarkar (1995) ao se substituir parte do cimento por adições minerais a estrutura da pasta transforma-se substancialmente; há uma alteração significativa na distribuição e tamanho dos poros, estando o seu comportamento, conforme constatado por diversos pesquisadores, relacionado às características químicas, mineralógicas, finura, quantidade e história térmica das adições.

Conforme Gastaldini (1996) as adições minerais reduzem a porosidade e a permeabilidade da pasta, de acordo com sua reatividade com o hidróxido de cálcio. As cinzas volantes do tipo F só promovem grandes alterações na microestrutura da pasta após algum tempo; já a cinza de casca de arroz e a sílica ativa atuam nas primeiras idades, devido a sua elevada área específica e alto grau de amorfismo.

Neville (1997) mostra que a utilização das cinzas em proporções elevadas, às vezes superiores a 50%, misturadas com cimento, trazem benefícios e vantagens técnicas para o concreto, desde a sua reologia e principalmente quanto a sua impermeabilidade e durabilidade quando endurecido.

Para Isaia et al.(2001) a utilização de adições minerais em concretos, além de benefícios, podem trazer também alguns efeitos colaterais, tal como o aumento do coeficiente de carbonatação.

A carbonatação é um fenômeno físico-químico decorrente da reação entre os constituintes ácidos do meio ambiente com o líquido intersticial existente nos poros do concreto, que se encontra saturado por hidróxido de cálcio (CH) proveniente da hidratação do cimento.

O processo ocorre por difusão gasosa do CO<sub>2</sub> (existente na atmosfera) na fase aquosa dos poros do concreto e pela posterior reação química do CO<sub>2</sub> dissolvido com o hidróxido de cálcio, formando os carbonatos e água. Esse mecanismo resulta na diminuição da alcalinidade da solução dos poros do concreto, propiciando a despassivação do aço e a possibilidade de desenvolvimento da corrosão.

Vagheti (1999) concluiu que o desenvolvimento mais rápido da carbonatação em concretos com adições minerais em comparação com aqueles com somente cimento Portland deve-se ao fato do desenvolvimento das reações pozolânicas induzirem uma diminuição dos teores de CH na solução dos poros; o aumento da velocidade de carbonatação deve-se à difusão do CO<sub>2</sub> ser mais rápida devido a menor quantidade de CH disponível para reagir.

Segundo Kazmierczak (1993) a carbonatação é um fator preponderante no desencadeamento da corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado. Apesar do fenômeno ser estudado há mais de três décadas, os problemas decorrente da carbonatação continuam ocorrendo em grande escala.

John & Tudisco (1993) mostram que, no Brasil, a principal forma de degradação é a corrosão das armaduras, associada principalmente à carbonatação de concreto em fachadas expostas a ciclos de molhagem e secagem. A carbonatação é maior quando não existe molhagem e secagem (ambiente Interno).

Para Vagheti (1999) por ser um fenômeno complexo que depende de muitas variáveis, como a finura, a natureza e a dosagem de cimento ou adi-

ções minerais; a relação a/ag; a duração e as condições de cura, principalmente no que tange à temperatura, à umidade e à concentração de CO<sub>2</sub> no ar; a porosidade, a permeabilidade e a compacidade da pasta de cimento endurecida; a resistência à compressão e também a presença de fissuras no concreto, a carbonatação do concreto é de grande importância para controlar a durabilidade das estruturas.

Como desvantagem da utilização das adições minerais, em altos teores, é a carbonatação, que se dá em maior intensidade e velocidade, em comparação a concretos de cimento Portland puro. A carbonatação mais acelerada deve-se tanto pelo consumo de CH pelas adições minerais, silicosas e amorfas, assim como pela diminuição do teor de cimento Portland.

A cal gerada pela hidratação do cimento mantém a reserva alcalina, em um nível de pH elevado. A diminuição da quantidade de cimento, aliada ao aumento da quantidade de adições, que consomem o hidróxido de cálcio, diminuem de forma conjunta o CH disponível, aumentando a velocidade da profundidade carbonatada.

Sabe-se que o aumento da profundidade carbonatada dá-se na proporção do aumento do teor de adição mineral em substituição ao cimento Portland, pois ocorre uma redução no teor de hidróxido de cálcio remanescente pela substituição do cimento.

A adição externa de cal hidratada comercial, nesta investigação, teve como objetivo principal estudar os efeitos da cal hidratada comercial nestes concretos e como influenciam na reserva alcalina e na velocidade de carbonatação.

## **1.2 OBJETIVOS**

A presente investigação trata do estudo de protótipos de concreto curados em condições ambientais, de onde foram extraídos testemunhos a partir da superfície do concreto e, após, a 2,5 e 5,0 cm de profundidade, com o intuito de estudar a influência da camada de cobrimento sobre o processo de carbonatação e teor de hidróxido de cálcio remanescente. Com o intuito de auxiliar na busca dos objetivos, também foram estudadas duas variáveis

auxiliares: Água combinada e estrutura dos poros representada pelos poros com diâmetro menores de 10 nm.

Foram empregadas misturas com cimento Portland (referência) e com sua substituição, em massa, por 50% de cinza volante, com e sem adição de cal hidratada. Empregou-se câmara climatizada para realizar os ensaios de carbonatação acelerada, determinando-se as profundidades neutralizadas em 4, 8 e 12 semanas. A partir destes dados foram calculados os coeficientes de carbonatação.

Os objetivos específicos da presente pesquisa foram os seguintes:

- Determinar a influência da adição de cal hidratada na carbonatação de concretos com altos teores de adições minerais;
- Comparar os resultados dos ensaios de carbonatação acelerada dos concretos com adições minerais com as misturas de referência de cimento Portland.
- Observar a influência do teor de hidróxido de cálcio remanescente sobre a carbonatação;
- Observar as relações entre a água combinada e a carbonatação.
- Observar a influência dos poros menores que 10 nm na carbonatação.

Essa dissertação encontra-se dividida em seis capítulos: sendo o primeiro a introdução sobre o assunto, o segundo enfoca os mecanismos da carbonatação, o terceiro trata da influência das pozolanas e da cal hidratada na carbonatação do concreto, compondo assim a revisão da literatura. O quarto capítulo trata da investigação experimental com a apresentação da caracterização dos materiais e detalhamento dos procedimentos de ensaios realizados. Os dados obtidos e as análises dos resultados, inclusive comparando-os com outros provenientes de pesquisas diversas estão no capítulo cinco e as conclusões e sugestões para pesquisas futuras compõem o capítulo seis, sendo o fecho deste trabalho.

## **DESCRIÇÃO E MECANISMOS DA CARBONATAÇÃO**

### **1.1 - RELAÇÃO ENTRE A DURABILIDADE DO CONCRETO E A CARBONATAÇÃO**

A durabilidade do concreto pode ser expressa como a sua resistência ao ataque de agentes agressivos do meio de exposição, de tal modo que a estrutura de concreto apresente uma vida útil compatível com o prazo para o qual foi projetada.

Segundo a NBR 6118 (2003) durabilidade consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.

Para o C.E.B apud Isaia (1992) a vida útil de uma estrutura é o período dentro da qual os materiais com as quais ela foi executada continuam a atender os propósitos para os quais foi projetada.

Uma das manifestações patológicas do concreto armado, com grande incidência e que tem sido largamente estudada, é a corrosão das armaduras, seja por carbonatação ou por ataque de cloretos. A carbonatação pode ocasionar a despassivação da armadura e propiciar o início de corrosão, razão pela qual tem sido objeto de diversas pesquisas, com o intuito de minimizar o seu efeito sobre as estruturas de concreto.

Aitcin (2000) diz que ao se projetar uma estrutura de concreto é essencial começar por definir as condições ambientais a qual o concreto estará sujeito durante a sua vida útil. Deste modo pode-se prever os efeitos do ambiente sobre a estrutura, e com um planejamento prévio minimizar ou evitar totalmente estes efeitos.

Observa-se, portanto, que ao ser caracterizado o tipo de agressão, deve-se produzir um concreto com materiais e dosagem que venham a proporcionar uma proteção contra o avanço da frente de carbonatação, minimizando a sua velocidade, visando obter-se maior durabilidade da estrutura, com maior proteção para as armaduras.



A especificação da vida útil de uma estrutura deve levar em conta os fatores que influenciam na velocidade da frente de carbonatação.

O reparo precoce, ou seja, antes do período estimado para término da vida útil, ou até mesmo a demolição de uma estrutura, gera custos econômicos e sociais, que poderiam ser evitados ou minimizados. Logo uma estrutura devidamente pré-concebida para resistir às agressões do meio na qual está inserida torna-se fundamental. A corrosão das armaduras é um dos fatores mais dispendiosos para reparação, devendo merecer atenção especial dos projetistas. A carbonatação, fenômeno que ocorre no concreto, é considerada um dos principais mecanismos condicionantes da corrosão das armaduras.

## **1.2 - CARBONATAÇÃO DO CONCRETO**

A carbonatação é um fenômeno que ocorre naturalmente nas estruturas de concreto, exigindo apenas certa concentração de  $\text{CO}_2$  no ar ambiente e variação de umidade.

Embora progrida lentamente no interior da estrutura, a partir de sua superfície, a carbonatação, ao longo dos anos, contribui para o rebaixamento do pH e a despassivação da armadura, ocasionando o processo de corrosão da mesma.

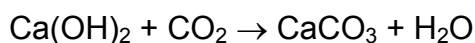
Sabe-se que a maior concentração de  $\text{CO}_2$  no ar favorece o incremento da taxa de carbonatação. Em ambientes urbanos, com tráfego intenso, a concentração em volume de  $\text{CO}_2$  no ar pode variar entre 0,1 e 1,2%, propiciando, na presença de umidade, maior difusão desse gás nos poros e capilares do concreto.

Para Helene (1993) a penetração do gás carbônico no concreto dá-se preponderantemente por um mecanismo de difusão. Portanto na maioria dos casos trata-se de gradientes de concentração de  $\text{CO}_2$ . Influirá a sua concentração no ambiente externo, junto à estrutura, comparativamente à concentração de  $\text{CO}_2$  nos poros capilares do concreto de cobrimento das armaduras.

Pode-se afirmar que, em poros saturados de água, o processo de carbonatação quase não ocorre, devido à baixa difusão do CO<sub>2</sub>, ao passo que, em poros excessivamente secos, o gás penetra facilmente, mas faltará água para que a reação ocorra, para a sua transformação prévia em ácido carbônico.

Por isso, em ambientes sujeitos a intempéries freqüentes, como chuva e sol intenso, a carbonatação da superfície do concreto é lenta ou praticamente nula. Por outro lado, em locais protegidos, onde a umidade se mantém na faixa entre 50 e 80%, a velocidade de avanço da frente de carbonatação é alto, contribuindo para a deterioração do concreto num prazo mais curto.

A principal reação que caracteriza o fenômeno da carbonatação é a seguinte:



O hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), liberado das reações de hidratação do cimento, reage com o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) ou outros gases ácidos, como o gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S) ou dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), formando os carbonatos (CaCO<sub>3</sub>) ou sulfatos (CaSO<sub>4</sub>) e água.

Outros compostos formados na hidratação do cimento também são suscetíveis ao processo, como o hidróxido de potássio (KOH) e o hidróxido de sódio (NaOH).

Segundo HELENE (1993) o hidróxido de cálcio Ca(OH)<sub>2</sub> é menos solúvel que outros álcalis do cimento, o hidróxido de sódio NaOH, e o hidróxido de potássio KOH. Dessa forma o hidróxido de cálcio encontra-se, na solução presente nos poros do concreto, normalmente na forma de cristais enquanto os outros estão dissolvidos na forma de íons. Como a solubilidade do Ca(OH)<sub>2</sub> depende da concentração de OH<sup>-</sup> na solução intersticial, a reação de carbonatação começa através dos álcalis NaOH e KOH passando a seguir ao Ca(OH)<sub>2</sub>.

O concreto, quando endurecido, possui uma elevada alcalinidade (pH entre 12 e 14), devido principalmente aos íons  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  presentes na solução intersticial dos poros do material.

Citação de KAZMIERCZAK (1993) “Neste pH e na presença de oxigênio, o aço se recobre de uma capa de óxidos muito aderente, que lhe protege da corrosão”.

Enquanto a armadura não for despassivada pela remoção desta camada de óxidos, o processo de corrosão não se inicia. Entretanto, pela ação de íons cloreto ou da carbonatação, os dois principais agentes desencadeantes da corrosão, esse ambiente de estabilidade química do concreto é modificado, alterando o pH de 12,5 para 8,3, segundo pesquisa de PAPADAKIS, FARDIS & VAYENDAS (1990).

Com esse pH baixo e na presença de oxigênio e certa umidade, ocorre a deflagração do fenômeno da corrosão do aço no interior do concreto.

Neste contexto, o fator preponderante para a durabilidade do concreto consiste em minimizar os efeitos da carbonatação, utilizando na especificação dos projetos um cobrimento adequado das armaduras para cada caso e também uma boa qualidade deste material, que garanta ao longo da sua vida útil uma adequada proteção contra os agentes agressivos.

### **2.2.1 – DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO**

A velocidade com que a carbonatação se desenvolve depende da quantidade de produtos carbonatáveis (conteúdo e tipo de aglomerante), da permeabilidade do concreto (relação  $a/a_g$ , cura, umidade, porosidade) e do conteúdo de  $\text{CO}_2$  no ar.

Nestas condições, sendo este fenômeno um processo de difusão, sua evolução depende da raiz quadrada do tempo ( $\sqrt{t}$ ), ou seja, a interface alcalina penetra em direção ao interior do concreto quase linearmente em relação à raiz quadrada da idade do concreto.

Esta aproximação é válida para ambientes internos, modificando-se para concretos em contato com o meio ambiente natural, sujeitos a molhagens e secagens sucessivas, quando a difusão do gás carbônico, condições de

umidade e de hidratação dos compostos do cimento farão com que a velocidade da frente de carbonatação avance em ritmo mais lento. (Schiessl, 1983).

Assim, é usual a representação da evolução da frente carbonatada pela expressão:  $x = k.t^n$ , sendo  $x$  a profundidade carbonatada,  $n$  em condições internas igual a 0,5 e  $k$  uma constante que depende da difusão e concentração do  $\text{CO}_2$ , das condições de exposição e das características do concreto, sendo expressa usualmente em  $\text{mm/ano}^{0.5}$ .

### **1.3 - VARIÁVEIS QUE INFLUEM NA CARBONATAÇÃO**

A carbonatação é um dos principais agentes de deterioração das estruturas de concreto, junto com a ação dos íons cloretos. Estes agentes não são prejudiciais ao concreto em si, mas especialmente na corrosão da armadura que está dentro dele.

Existem, portanto, fatores que afetam preponderantemente o concreto, como a lixiviação, a expansão ocasionada pela reação álcali-agregado e por ação dos sulfatos, bem como fatores que atacam preponderantemente a armadura, despassivando-a, como é o caso da carbonatação e dos cloretos.

O fenômeno da carbonatação dos concretos é muito complexo, pois muitas variáveis físico-químicas se inter-relacionam e determinam um processo de maior ou menor intensidade de avanço da frente carbonatada.

Essas variáveis são pesquisadas há várias décadas, contribuindo para melhor interpretação do fenômeno na microestrutura do concreto, auxiliando também na busca de novas misturas e adições que aumentem a durabilidade e a vida útil das estruturas.

#### **2.3.1 RELAÇÃO ÁGUA / MATERIAIS CIMENTÍCIOS**

Com a diminuição da relação  $a/mc$  ocorre um decréscimo da profundidade carbonatada. Helene et al. (1999) mostram, através da figura 1, que a espessura carbonatada apresenta uma curva ascendente de crescimento com a relação água/cimento, em concretos com cimento Portland CP II-F32 (NBR 11578). Os autores mostram também que para diferentes concretos

com mesmo valor de abatimento a espessura carbonatada cresceu com o aumento do fator  $a/mc$ ; que as profundidades carbonatadas foram praticamente as mesmas para os concretos de mesmo fator  $a/mc$  independente do aumento do abatimento; que para um mesmo abatimento, o aumento do consumo de cimento por metro cúbico de concreto com o objetivo de reduzir a relação  $a/mc$ , reduz a espessura carbonatada; que para uma mesma relação  $a/mc$ , o aumento do consumo de cimento por metro cúbico de concreto com objetivo de elevar o abatimento tem pouca influência na espessura carbonatada; e finalmente concluí que é mais correta a especificação de durabilidade do concreto que limitem a relação  $a/mc$  máxima do que o consumo mínimo de cimento por metro cúbico de concreto.

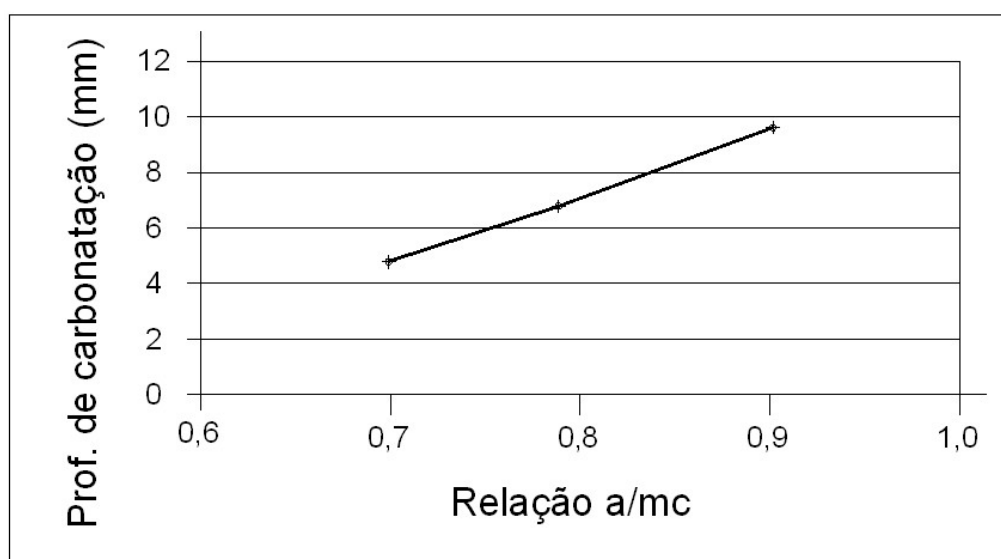


Figura 1 – Profundidade de Carbonatação x Relação  $a/mc$  (HELENE ET AL 1999)

Kokubu & Nagataki (1989) em estudo de concretos com adição de cinza volante de 30%, em condições de exposição natural, com idades de 2 e 20 anos, mostram que o aumento da relação  $a/mc$  provoca um aumento na profundidade carbonatada, mostrado na figura 2.

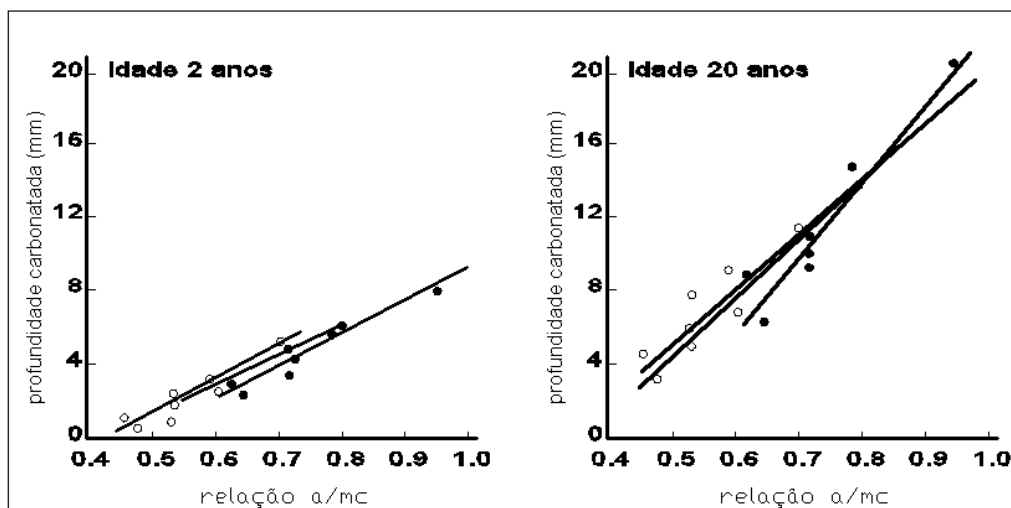


Figura 2 – Relação entre profundidades carbonatadas e relação a/mc, (Kokubu & Nagataki, 1989)

F – Cinza volante, C – Cimento Portland

Skojosvold (1986) estudou 24 diferentes misturas de concreto com cimento e sílica ativa, e mostra que a profundidade de carbonatação cresce com o aumento do fator a/mc, conforme figura 3. Os concretos foram curados por um dia na forma e 27 dias em cura úmida, e foram expostos durante 6 anos em ambiente de 20° C e 50% de U.R.

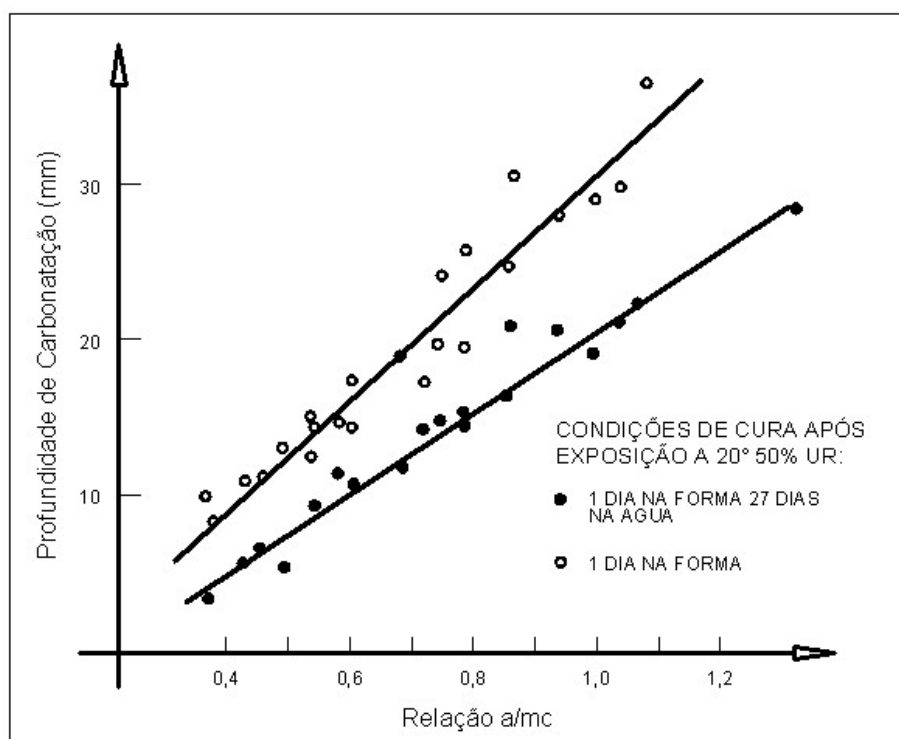


Figura 3 – Profundidade de Carbonatação após 6 anos de exposição a 20°C e 50% UR (SKOJOSVOLD, 1986)

Observa-se que o aumento na relação  $a/mc$  leva a acréscimos nas profundidades carbonatadas. O fato deve-se ao aumento da porosidade e da permeabilidade do concreto, que fica mais suscetível à difusão do  $CO_2$  atmosférico.

### 2.3.2 POROSIDADE DA PASTA DO CONCRETO

A porosidade da pasta tem relação direta com a relação  $a/mc$ , logo quando uma cresce, em geral a outra cresce também, levando a um aumento da profundidade carbonatada.

Almeida (1991) observou uma correlação relativamente forte, 0,88, entre a carbonatação e a porosidade aberta. Esta correlação é muito semelhante à observada com a relação  $a/mc$ , mostrados na figura 4.

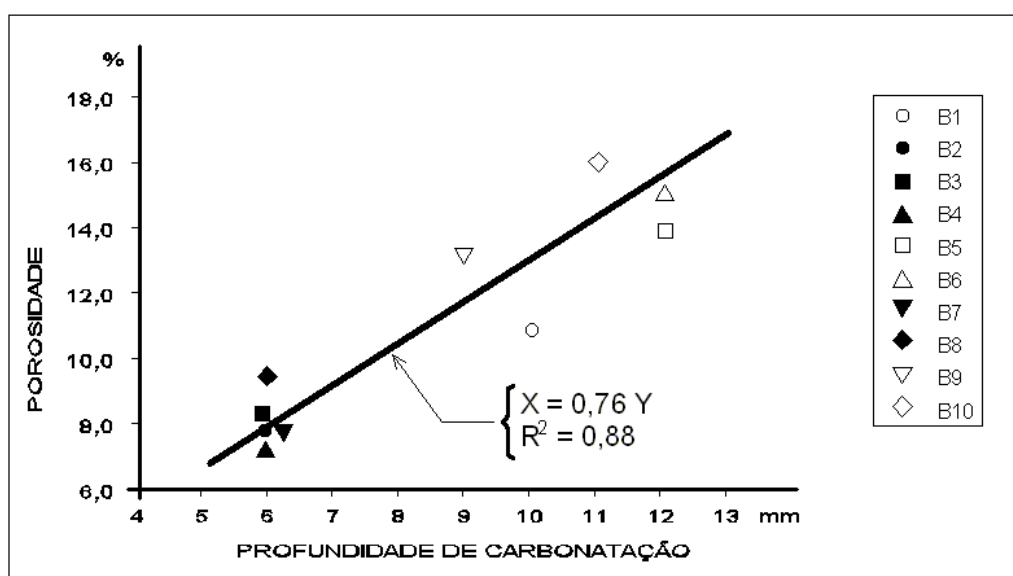


Figura 4 – Correlação entre a porosidade aberta e a profundidade de carbonatação aos 2 anos de idade (ALMEIDA, 1991)

Trabalho de Bier, Kropp & Hilsdorf (1989) em concretos com cimento Portland comum, e cimento Portland com escória de alto forno, mostra que a profundidade carbonatada aumenta com o aumento do raio dos poros abertos, conforme pode ser visto na figura 5.

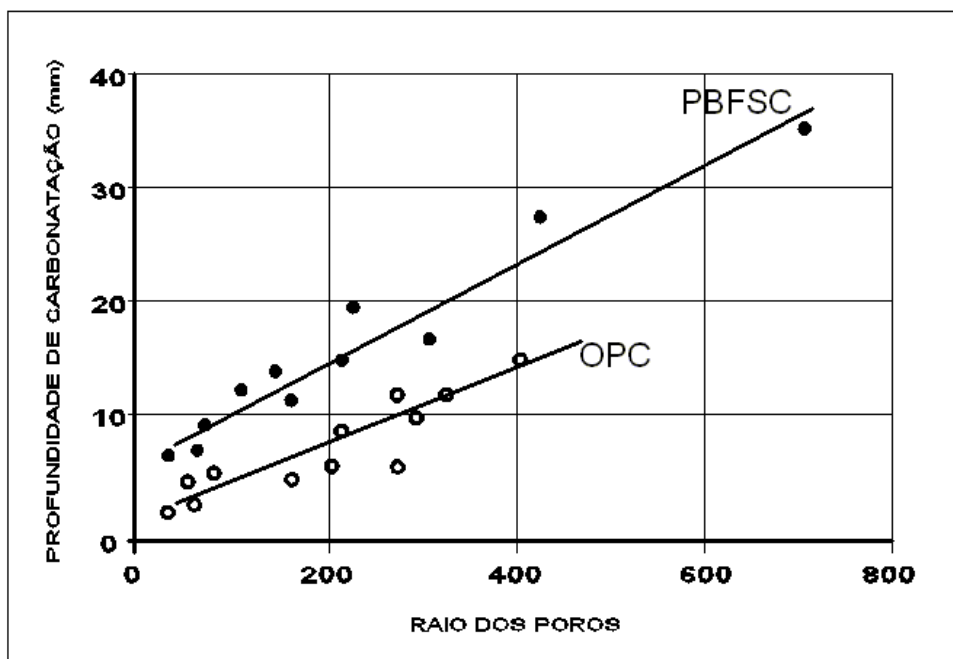


Figura 5 – Profundidade de carbonatação em função do raio dos poros abertos (OPC – cimento Portland comum, PBFSC – cimento Portland com escória de alto forno) - (BIER, KROPP & HILSDORF 1989)

A porosidade aberta, ou seja, os poros superficiais do concreto abertos para o exterior em contato direto com o ar atmosférico; é determinada pelo ensaio de absorção capilar ou pelo ensaio de intrusão de mercúrio, tem grande importância na carbonatação, pois o seu aumento propicia maior difusão dos gases atmosféricos junto aos poros, ocorrendo em maior grau a reação de carbonatação.

### 2.3.3 DOSAGEM DO CIMENTO E AS ADIÇÕES MINERAIS

A alcalinidade da pasta é função da composição química do cimento, em especial do teor de cálcio, e do teor de compostos cálcicos hidratados. Assim, o cimento Portland, sem adições minerais, produz um concreto com maior reserva alcalina, comparado com concretos feitos com cimentos com adições minerais.

Conforme Isaia, Vaguetti & Gastaldini (1998) cimentos com adições minerais resultam em frentes de carbonatação mais velozes do que no cimento Portland comum, apesar das adições propiciarem um maior refina-



mento dos poros e dos grãos, aumentando a tortuosidade dos capilares e diminuindo a permeabilidade.

Isaia (1995) em estudos com misturas binárias e ternárias, com cinza volante, com cinza de casca de arroz, sílica ativa ou escória de alto forno, percebeu que tais misturas apresentam velocidade de carbonatação crescentes com o aumento do teor das adições minerais, devido ao fato das mesmas terem menores teores de cimento e conseqüentemente menor teor de CH remanescente.

Estudos realizados por Jiang, Lin & Cai (2000) com adições de cinza volante em substituição ao cimento, em teores de 55% e 70%, mostram que a profundidade da frente de carbonatação é maior nos concretos com altos teores de adição de cinza volante, em relação ao concreto de cimento Portland comum. No mesmo trabalho, afirmam que no projeto de estruturas de concreto, a carbonatação é um dos muitos fatores importantes que determinam a vida útil de serviço de uma estrutura de concreto.

Vaguetti (1999) estudou 11 concretos com adições minerais de cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa, em misturas binárias e ternárias, com teores entre 10% e 50% de substituição, mostrando haver aumento de profundidade carbonatada com aumento de substituição de cimento por uma ou mais adições.

Helene, Mitidieri & Thomaz (1995) mostram que o tipo de cimento influi na carbonatação, sendo os índices de profundidade carbonatada do cimento CP V (cimento Portland ARI) inferiores aos dos cimentos CP II E (cimento Portland composto) e CP III (cimento Portland de alto forno). Os cimentos CP II E tem teor de escória de alto forno de 13,7%, CP III, 67,8% e o CP V não tem qualquer tipo de adição pozolânica ou cimentante.

Segundo Nagataki, Ohga & Kim (1991) concretos com adição de cinza volante mostram aumento na profundidade carbonatada com a adição de 30%, em relação ao concreto de referência. Estes autores concluem que o aumento do teor de cimento por metro cúbico de concreto diminui as profundidades de carbonatação, como pode ser observado na figura 8. Estes autores, em trabalho posterior (1992), mostram o aumento dos coeficientes de

carbonatação, com o aumento do teor de substituição do cimento por cinza volante, como mostra a figura 6.

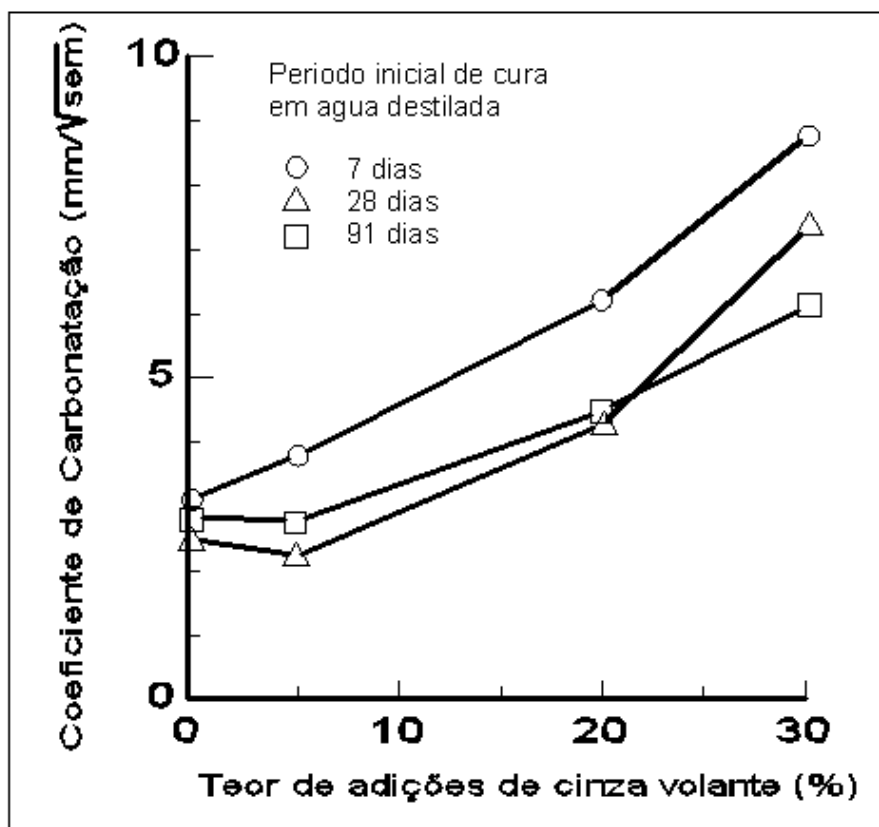


Figura 6 – Efeito do teor de adições de cinza volante no coeficiente de carbonatação em argamassas curadas em água destilada (NAGATAKI & OHGA 1992)

Venquiaruto (2002) estudou misturas binárias de CV e CCA em teores de substituição de 25% e 50%, e concluiu que ocorre aumento dos coeficientes de carbonatação com aumento do teor de substituição, independente da relação a/mc.

#### 2.3.4 PROCESSOS DE CURA

Para Thomas & Matthews apud Kazmierczak & Helene (1993) corpos-de-prova de concreto com adição de cinza volante, curados a 20°C e UR de 65%, apresentaram profundidade de carbonatação decrescente com o aumento do tempo de cura de 1, para 3, e de 3 para 7 dias.

Nagataki & Ohga (1992) em concretos com adição de cinza volante em teores de 0%, 5%, 20% e 30%, mostram que quanto maior o teor de adição mineral, mais influência tem o período inicial de cura úmida sobre o coeficiente de carbonatação. Para o teor de adição de 30% o tempo de cura de 4 para 13 semanas apresenta diminuição no coeficiente de carbonatação de aproximadamente  $1.5 \text{ mm}/\sqrt{\text{sem}}$ . Para os demais teores de adição, o decréscimo se dá para o período de 1 para 4 semanas, de 4 para 13 semanas não há decréscimo para os teores de 0%, 5% e 20%, conforme figura 7.

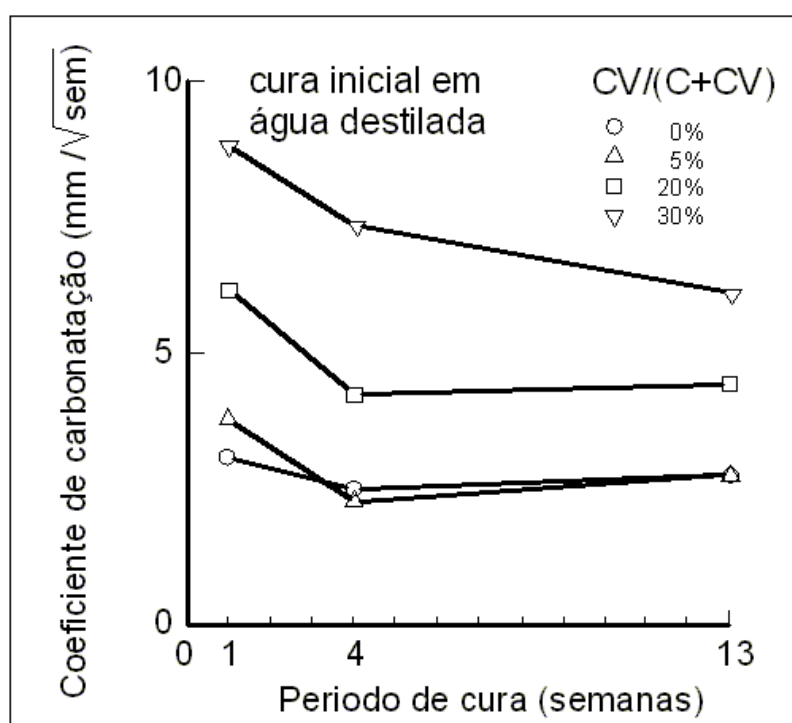


Figura 7 – Efeito do período de cura em água destilada (NAGATAKI & OHGA, 1992)

### 2.3.5 AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

Segundo a NBR 6118 (2003) a agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas de concreto.

Para elaboração de projetos estruturais, a NBR 6118 (2003) divide a agressividade ambiental em classes que variam segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes.

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental

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

<sup>1)</sup> Pode-se admitir um micro-clima com classe de agressividade um nível mais brando para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

<sup>2)</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade um nível mais branda em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuvas em ambientes predominantemente secos ou regiões onde chove raramente.

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

Kokubu & Nagataki (1989) relacionam o período de cura com o ambiente de exposição, e mostram que para concretos em ambientes externos, o período de cura úmida de 7 dias é adequado, mas para concretos internos, este período é insuficiente, e concluíram que quando a cura é adequada (7 dias), para ambos os casos, a profundidade de carbonatação dos concretos internos é de 2 a 4 vezes maior do que para os concretos externos.

Segundo Nagataki, Ohga & Kim (1991) a reposição de cinza volante de 0% e 30%, em concretos curados em ambiente externo, o avanço da frente carbonatada é grande nos dois primeiros anos e diminui após 5 anos. Há gradual mas pequeno incremento entre 5 e 15 anos.

Quando o concreto foi curado por 24 horas, a profundidade de carbonatação foi significativamente grande durante os dois primeiros anos. Depois de dois anos, foi similar aos concretos curados em períodos maiores.

Os concretos curados por 7, 28 e 91 dias mostram pequena diferença nas profundidades de carbonatação. O período inicial de cura influencia marcadamente na profundidade de carbonatação nas primeiras idades.

Em concretos curados em ambiente interno, a profundidade carbonatada foi muito maior do que os concretos em ambientes externos, por que a concentração de  $\text{CO}_2$  foi maior e havia menor quantidade de água.

A profundidade carbonatada cresce significativamente após 5 anos, principalmente para concretos com adição de cinza volante, para os quais existe significativa diferença entre as amostras curadas por 7 dias e as curadas por 91 dias.

Observa-se, na figura 8, a dependência do teor de cimento na mistura ( $250 \text{ Kg/m}^3$ ;  $330 \text{ Kg/m}^3$ ), do teor de substituição do cimento (30%) e do ambiente de exposição nas profundidades carbonatadas.

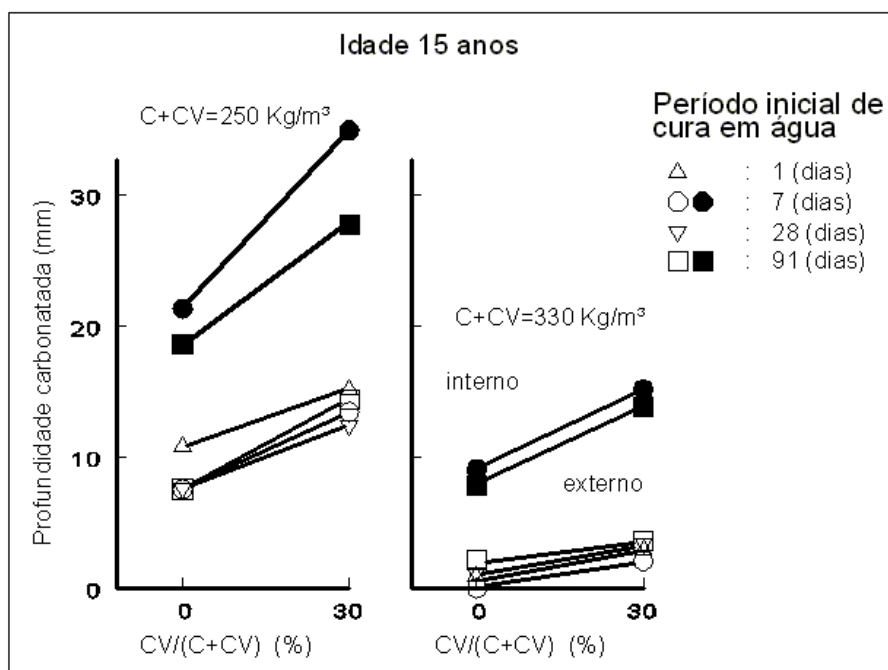


Figura 8 – Concretos em ambientes externos e internos, com 0% e 30% de cinza volante e consumo de cimento + CV de 250 e 330  $\text{Kg/m}^3$  (NAGATAKI, OHGA & KIM 1991)

Castro, Moreno & Genescá (1999) estudaram a influência do microclima marinho, em estruturas de concreto armado no México, e mostraram que para estruturas com propriedades de dosagem semelhantes, a profundidade carbonatada cresce com a altitude, e com a orientação oeste para leste, para as condições de clima estudadas. Para as mesmas estruturas a profundidade carbonatada cresce com a distância da costa.

Em estudos realizados no litoral do Kuwait, Al-Khaiat & Haque (1997) mostram que concretos em estruturas de prédios públicos apresentaram maiores profundidades carbonatadas em ambientes externos do que em ambientes internos, em todas as estruturas pesquisadas.

Devido ao clima marinho, os ambientes externos têm maior umidade do que os ambientes internos, que normalmente são climatizados com ar condicionado.

Os autores concluem que as profundidades carbonatadas em estruturas localizadas no litoral, mais afastadas da costa, foram maiores do que para estruturas localizadas a beira mar.

O mesmo trabalho mostra que a fumaça liberada pela queima de petróleo não tem influência significativa no aumento das profundidades carbonatadas.

Helene (1986) diz que “atmosferas industriais podem acelerar em 60 a 80 vezes mais o processo de corrosão, quando comparadas a situações equivalentes em atmosferas rurais”.

Isto ocorre devido à ação de gases ácidos que reduzem a alcalinidade do concreto ou mesmo diminuem fisicamente a camada de recobrimento, facilitando a penetração e a ação dos agentes agressivos.

### **2.3.6 CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub>**

A penetração do CO<sub>2</sub> nos poros do concreto ocorre por difusão, através de um gradiente de concentração, logo quanto maior a concentração externa de CO<sub>2</sub>, maior o gradiente e maior a penetração nos poros do concreto.

Ensaio acelerados de carbonatação com teores de concentração de CO<sub>2</sub> superiores aos normais atmosféricos produzem profundidades maiores em menor espaço de tempo.

Isaia et al. (2001) em estudo comparativo de corpos-de-prova de concreto com pozolanas ensaiados a carbonatação acelerada em câmara condicionada com 10% de CO<sub>2</sub> e carbonatação em ambiente de laboratório por dois anos, concluiu que para misturas com até 25% de pozolanas, o incre-

mento do coeficiente de carbonatação acelerada foi pequeno para relações  $a/mc$  até 0,45 e moderado a partir deste valor; e que para concretos com teor de 50% de pozolanas os incrementos dos coeficientes de carbonatação acelerada foram muito significativos a partir da relação  $a/mc$  0,35.

Ao estabelecer relações entre os coeficientes de carbonatação natural e acelerada, conclui que para as misturas com até 25% de pozolanas, os coeficientes revelam equivalência de  $1,0 \text{ mm/sem}^{0.5} = 1,0 \text{ mm/ano}^{0.5}$ ; e para as misturas com substituição de 50% de pozolanas a relação passa para  $1 \text{ mm/sem}^{0.5} = 3,6 \text{ mm/ano}^{0.5}$ .

Conclui ainda que o aumento da velocidade do coeficiente de carbonatação dos ensaios acelerados em relação aos ambientais, para misturas com altos teores de pozolanas, podem ser explicados pela maior concentração de  $\text{CO}_2$  na câmara condicionada, menor reserva alcalina das misturas pozolânicas e variação do teor de umidade do concreto exposto ao meio ambiente natural, que não ocorre na câmara climática, onde é mantido um teor de umidade fixo constante.

Existe linearidade entre a profundidade carbonatada e a raiz quadrada do tempo multiplicada pela concentração molar de  $\text{CO}_2$ , (Papadakis apud Isaia, 1995).

O fenômeno da carbonatação envolve diversos processos físico-químicos, a saber: difusão do  $\text{CO}_2$  gasoso nos poros do concreto; dissolução e difusão do hidróxido de cálcio na água dos poros; dissolução do  $\text{CO}_2$  na água dos poros e a reação com o hidróxido de cálcio. Também ocorre a reação do  $\text{CO}_2$  com os álcalis dissolvidos e com os outros produtos de hidratação do cimento, fases silicatos e aluminatos hidratadas, que são menos solúveis (Papadakis et al., 1991; Papadakis, 2000a).

Isaia realizou a regressão linear de 10 pesquisas e obteve coeficiente de correlação de 0,93, mostrando que existe grande correlação entre a profundidade carbonatada e a raiz quadrada do produto entre o tempo de exposição e a concentração molar de  $\text{CO}_2$ .

### 2.3.7 SATURAÇÃO DOS POROS

A umidade relativa do ar, influi diretamente no grau de saturação dos poros. O  $\text{CO}_2$  penetra nos poros do concreto por difusão, quando os poros estão saturados, a velocidade de difusão é muito pequena, tornando o processo de carbonatação lento.

A baixa umidade praticamente impede a dissolução da cal sólida e dos gases na água capilar.

Estudos mostram que as maiores velocidades de carbonatação ocorrem para umidades relativas entre 50% e 80% (Isaia, Vaguetti & Gastaldini 1998), e conforme figura 9 de Venuat apud Rosenberg (1989).

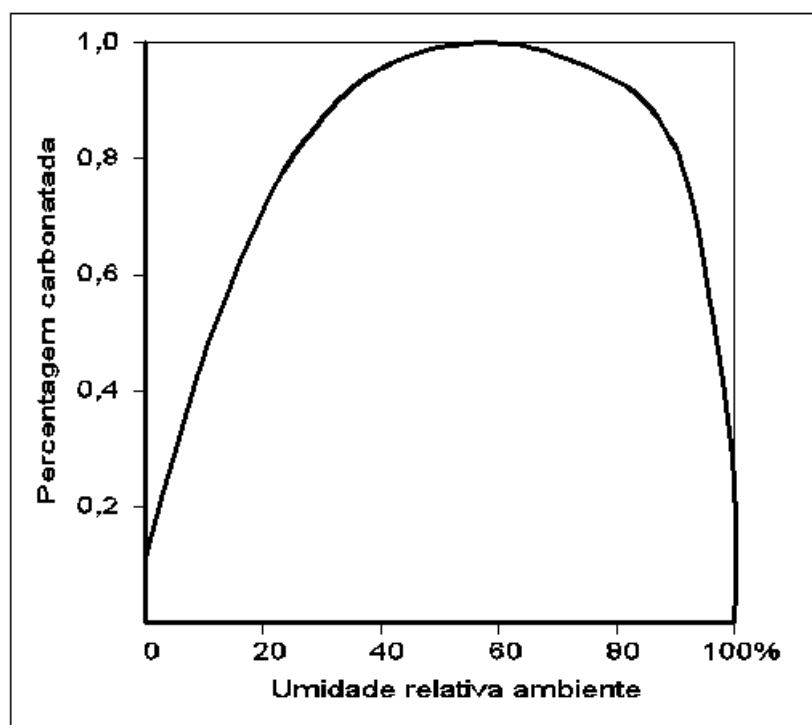


Figura 9 – Profundidade carbonatada como função da umidade relativa (VENUAT APUD ROSENBERG, 1989)

Wolf & Dal Molin (1989) avaliaram misturas com argamassas de cimento Portland (CP 32), cimento Portland pozolânico (POZ 32), cimento Portland de alto forno (AF 32) e cimento Portland de alta resistência inicial (ARI), com relações a/mc de 0,4; 0,5; 0,65; 0,8 e 1,0, em ambientes com umidades relativas de 30%, 50%, 70% e 90%, em ensaios de carbonatação natural aos 7,



14, 28 e 42 dias. Wolf & Dal Molin mostram que as maiores profundidades carbonatadas ocorreram para a UR de 70%, fato acentuado pelo aumento da relação a/mc.

Em UR muito baixa (30%), não ocorreu carbonatação, pois a umidade existente na argamassa não é suficiente para que a reação ocorra. Os autores concluem que a UR, juntamente com a relação a/mc, são as variáveis que exercem maior influência sobre a carbonatação.

### **2.3.8 TEOR DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO REMANESCENTE**

O teor de CH presente na água dos poros do concreto tem fundamental importância na velocidade de carbonatação, visto ser a reação de carbonatação realizada entre os gases atmosféricos, principalmente o  $\text{CO}_2$  e os álcalis do concreto, principalmente o CH. Quanto maior o teor de CH, maior a reserva alcalina, e mais lento será o avanço da frente carbonatada, pois haverá maior teor de CH a ser consumido pelas reações de carbonatação.

Para Isaia, Vaguetti & Gastaldini (1998) existe relação entre o teor de CH remanescente e os coeficientes de carbonatação, em misturas binárias e ternárias de sílica ativa, cinza volante e cinza de casca de arroz, conforme a figura 10. Observa-se que os teores mais elevados de substituição apresentam menores teores de hidróxido de cálcio remanescente.

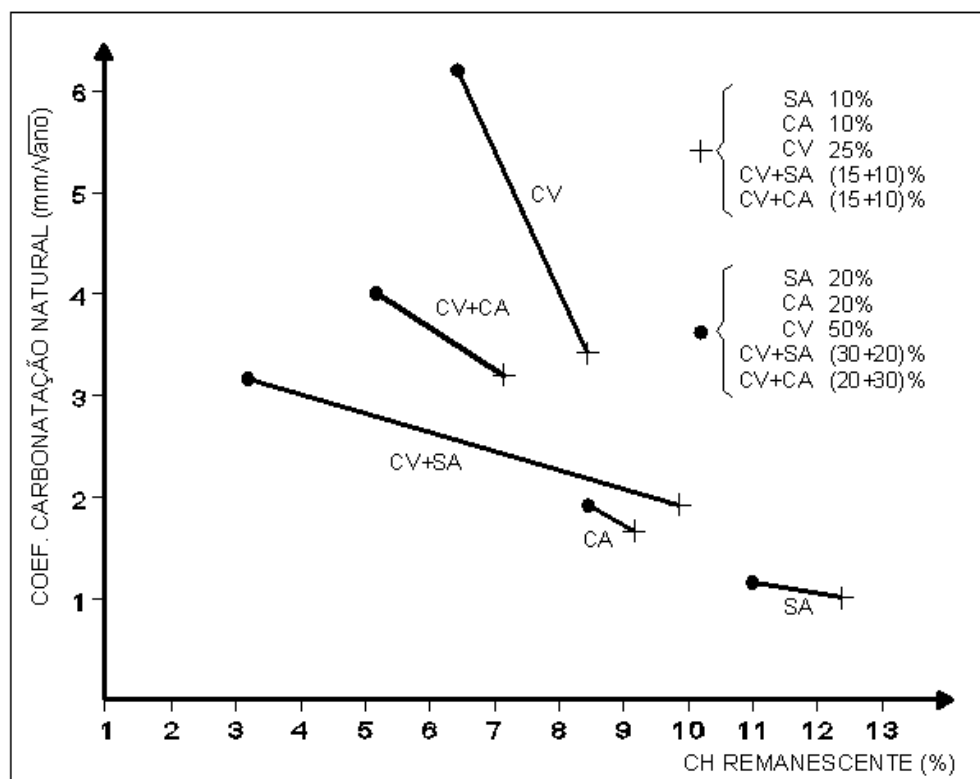


Figura 10 – Correlação entre o coeficiente de carbonatação natural e o teor de hidróxido de cálcio remanescente para nível de resistência de 70 MPa (ISAIA, VAGUETTI & GASTALDINI, 1998)

Vagueti (1999) relacionando misturas binárias e ternárias de sílica ativa, cinza volante e cinza de casca de arroz, conclui que existe uma correlação entre o teor de CH remanescente e os coeficientes de carbonatação, onde constata que a mistura de referência (100% de cimento Portland) apresentou o maior teor de CH remanescente e o menor coeficiente de carbonatação.

### 2.3.9 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão axial, que é uma função direta da relação  $a/mc$ , também serve de parâmetro para comparação com as profundidades carbonatadas e com os coeficientes de carbonatação.

Kokubu & Nagataki (1989) traçaram correlação entre concretos com dois tipos de cimento: cimento Portland comum, e cimento Portland de baixo

calor de hidratação, ambos com adições de 0%, 5% e 30% de cinza volante, em 4 idades diferentes: 2, 5, 10 e 20 anos de exposição, onde encontraram correlação entre a resistência à compressão axial e os coeficientes de carbonatação. Observam que com aumento da resistência à compressão axial, ocorre uma diminuição nos coeficientes de carbonatação.

Segundo Ohga & Nagataki (1989) em concretos com adição de 0% e 30% de cinza volante, com cura úmida de 7, 28 e 91 dias e resistência à compressão axial de 28 dias, observaram também uma correlação linear entre o coeficiente de carbonatação e a resistência à compressão axial.

Para Nagataki, Ohga & Kim (1991) em concretos com 0% e 30% de adição de cinza volante, curados por períodos de 1, 7, 28 e 91 dias, e expostos em ambientes externos e internos por 15 anos, figura 11, mostram correlação linear entre as profundidades carbonatadas e a resistência à compressão axial aos 28 dias.

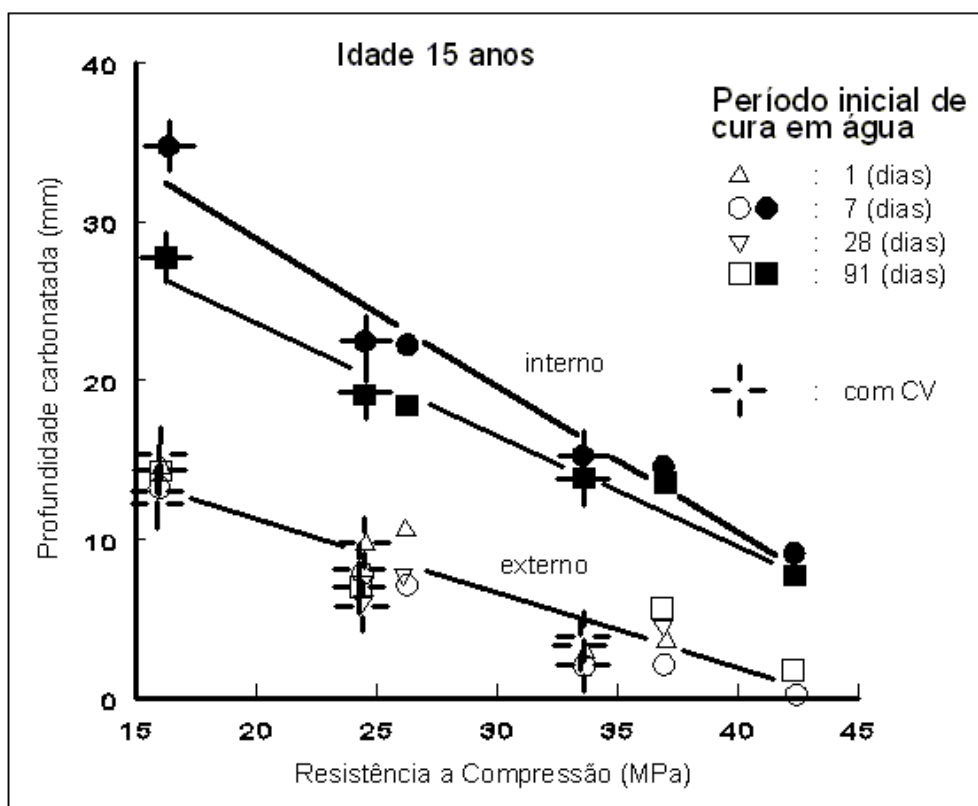


Figura 11 – Relação entre a resistência a compressão e a profundidade de carbonatação (NAGATAKI, OHGA & KIM, 1991)

Alves (2000) relacionou misturas binárias e ternárias de cinza volante e cinza de casca de arroz, comparados em nível de resistência de 35 e 65 MPa, onde os coeficientes de carbonatação foram 1,81 vezes menores para reposição de 50% de cinza de casca de arroz, e 3,94 vezes menores para reposição de 50% de cinza volante, com o aumento de resistência de 35 para 65 MPa.

Isaia, Vaguetti & Gastaldini (1998) estudando misturas binárias de sílica ativa (10% e 20%), cinza volante (25% e 50%), cinza de casca de arroz (25% e 50%), e misturas ternárias de CV+SA (15+10% e 30+20%), e CV+CA (10+15% e 20+30%), mostram relação entre os coeficientes de carbonatação e a resistência à compressão axial. Concluíram que para o mesmo nível de resistência os coeficientes de carbonatação variaram do menor para o maior valor de 122 vezes aos 28 dias e 97 vezes aos 91 dias.

Venquiaruto (2002) em misturas com CV e CCA, em teores de 25% e 50%, com duas finuras (finura 1 e finura 2), mostra uma correlação entre as resistências à compressão axial e os coeficientes de carbonatação acelerada, conforme figura 12.

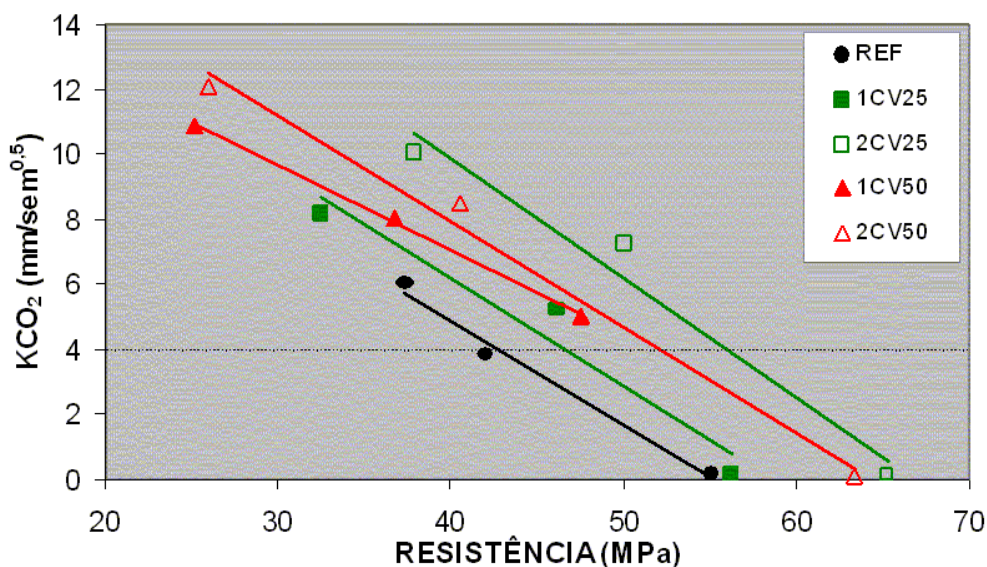


Figura 12 – Correlação entre a resistência a compressão axial e o coeficiente de carbonatação para CV (VENQUIARUTTO, 2002)

Observa-se que para a resistência de 40 MPa não é possível obter-se concretos com coeficientes de carbonatação menores que  $4 \text{ mm/sem}^{0.5}$ . Para a resistência de 60 MPa apenas as misturas 2CV50 e 2CV25 tiveram coeficiente inferior a  $4 \text{ mm/sem}^{0.5}$ , como pode ser visto na figura 13.

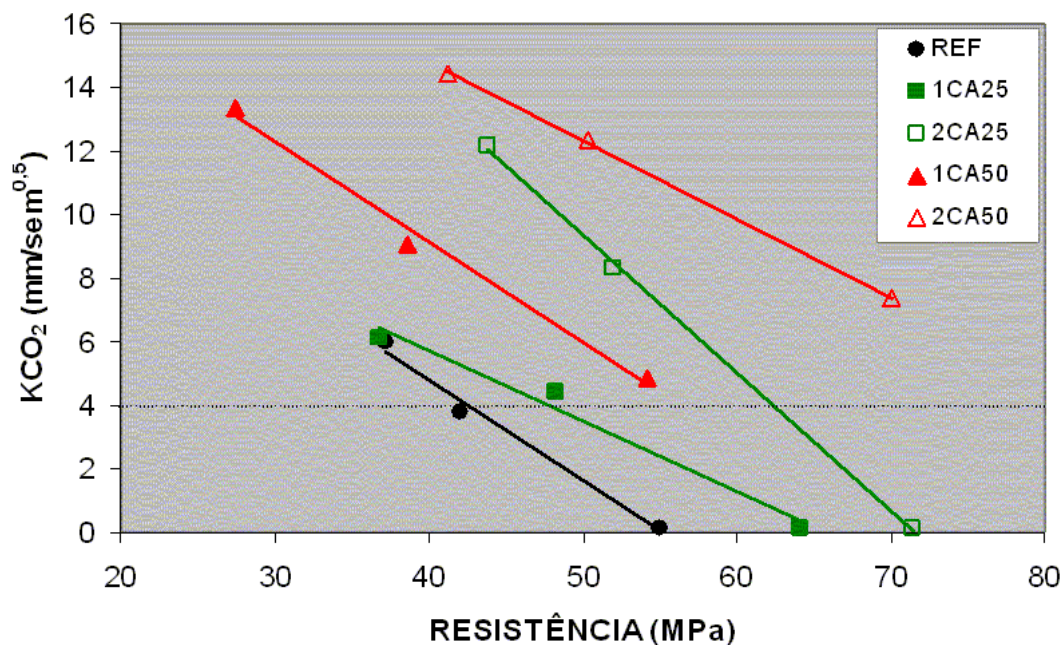


Figura 13 – Correlação entre a resistência a compressão axial e o coeficiente de carbonatação para CCA (VENQUIARUTTO, 2002)

Venquiarutto (2002) mostra que para a CCA, na resistência de 40 Mpa, nenhuma das misturas apresentou coeficiente menor do que  $4 \text{ mm/sem}^{0.5}$ . Observou também que as misturas 1CA25 e 2CA25 apresentaram coeficientes de carbonatação de  $4 \text{ mm/sem}^{0.5}$  para as resistências de 48 MPa e 62 MPa. As misturas 1CA50 e 2CA50 apresentaram coeficientes maiores que  $4 \text{ mm/sem}^{0.5}$  para todos os níveis de resistência.

## ***INFLUÊNCIA DAS POZOLANAS E DA CAL NA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO***

### ***3.1 INTRODUÇÃO***

Grande parte dos problemas ecológicos atuais, acarretados pela exploração dos recursos minerais para a produção do cimento, podem ser reduzidos ou minimizados se parte do cimento utilizado no concreto for substituído por um ou mais tipos de adições minerais. Dessa maneira, é possível reduzir a extração de argila, calcário e a emissão de gases poluentes na atmosfera.

As pesquisas de laboratório e as obras têm demonstrado diversas vantagens técnicas que as adições produzem nas características do concreto, tanto no estado fresco, como no concreto endurecido. Isto é obtido pelas reações pozolânicas, que consomem o hidróxido de cálcio, produzindo compostos semelhantes aos da hidratação do cimento, preenchendo os poros e tornando a microestrutura mais compacta.

As adições atuam por reação química, por meio das reações pozolânicas, e também por ações físicas, quando as suas partículas finas atuam como agente defloculante dispersando os grãos de cimento, e atuando também como filler, bloqueando os poros.

A utilização de adições minerais iniciou-se pelo uso da cinza volante em obras de barragens de concreto massa, com o intuito de diminuir o calor de hidratação e o custo do concreto.

Na década de 70, começou-se a utilizar a sílica ativa em estruturas de concreto, com a intenção de aumentar a resistência e melhorar a trabalhabilidade.

Segundo Missau (2004) a utilização da cinza de casca de arroz no Brasil ainda é muito pequena, limitando-se a estudos de laboratório, ou obras experimentais.

A escória de alto forno é utilizada, também, para a obtenção do cimento Portland de alto forno.

A hidratação do cimento libera cal, que contribui muito pouco para a resistência da pasta de cimento e pode ser responsável por problemas de durabilidade, uma vez que pode ser solubilizada facilmente pela água. Esta lixiviação resulta em aumento da porosidade da pasta, segundo Aitcin, (2000).

O mecanismo que influi diretamente na durabilidade do concreto é a porosidade, pois a água percola e se difunde através dos poros, carregando os íons agressivos, que controlam os processos físicos, químicos ou físico-químicos de degradação do concreto.

A adição de pozolanas no concreto, produz uma densificação da pasta, e da interface pasta agregado, produzindo um concreto mais homogêneo e um refinamento maior dos poros, diminuindo a porosidade da pasta.

As adições também beneficiam a ecoeficiência, pois são subprodutos industriais e agrícolas poluentes, que incorporados ao concreto, contribuem para a conservação energética, devido ao menor consumo de cimento e de recursos minerais, argila e calcário.

O que se busca atualmente é o desenvolvimento auto-sustentável, ou seja, os recursos naturais são de todos e para todos, devendo ser administrados visando o menor impacto sobre o meio ambiente, com menor custo econômico.

A ecoeficiência é um conceito que quando aplicado ao processo produtivo produz lucro para todos, porque acarreta benefícios ecológicos pela conservação de energia e materiais e produz um melhor resultado econômico para quem produz.

### **3.2 CINZA VOLANTE**

Cinza volante é o resíduo de carvão mineral utilizado em usinas termelétricas, na produção de energia elétrica.

A Usina Termelétrica de Candiota, RS produz aproximadamente 1.000.000 toneladas/ano de cinzas, sendo 80% volantes e 20% pesadas (Silva et al. 1999).

As 800.000 toneladas de cinzas volantes possuem características para serem utilizadas como adição mineral em concretos.

Além de que a sua disposição no meio ambiente pode produzir sérios problemas de poluição.

A cinza volante é obtida por precipitação dos gases de exaustão de usinas alimentadas por carvão mineral, normalmente para a produção de energia elétrica, a temperaturas de 1200 a 1600 °C. As suas partículas são esféricas, podem conter cenosferas, ou seja, esferas ocas, e em alguns casos podem conter partículas angulosas, e tem uma finura muito grande, com diâmetros entre 1µm e 100 µm, e área específica Blaine entre 250 m<sup>2</sup>/Kg e 600 m<sup>2</sup>/Kg.

A sua composição química depende da composição do carvão que lhe originou, sendo bastante variável.

A ASTM classifica as cinzas volantes em dois tipos, a Classe F e a Classe C.

As cinzas volantes da Classe C caracterizam-se pelo elevado teor de cálcio, e são oriundas da queima de lignita ou carvão betuminoso.

A Classe F é obtida da queima de antracito ou carvão sub-betuminoso.

Segundo Aitcin, (2000) a classificação francesa é em três grupos, as sílico-aluminosas, as sílico-cálcicas, e assulfo-cálcicas.

As cinzas volantes compõem-se basicamente por compostos de sílica e alumina, que são oriundos dos argilominerais (caulinita, montmorilonita, illita), dos óxidos (quartzo) e dos silicatos (cloritas).

Trabalho da Associação Brasileira de Cimento Portland, conforme Silva et al. (1999) leva à conclusão que a cinza volante de Candiota constitui-se de material vítreo de natureza sílicoaluminosa e em menor proporção de compostos cristalizados, sob a forma de quartzo (SiO<sub>2</sub>), mulita (SiO<sub>13</sub>Al<sub>16</sub>) e hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Com menor frequência, foi detectada a presença de material carbonoso.

Do ponto de vista mineralógico, de acordo com a ABCP, não há restrições quanto ao uso da amostra como material pozolânico, podendo salien-



tar-se alguns aspectos favoráveis como a frequência e pequena dimensão média das cenosferas e o reduzido teor de material carbonoso, comparativamente às cinzas volantes nacionais.

Trabalhos de Andrade e Kihara apud Silva et al. (1999), revelam uma predominância, nas cinzas de Candiota, de material amorfo numa faixa de 60 a 75%. A fração cristalina é de cerca de 20% de mulita, 30% de quartzo, 30% de óxidos de ferro, e 2% de mica e outros.

Observam-se as excelentes propriedades pozolânicas das cinzas volantes, provenientes da Usina Termelétrica de Candiota, sendo sua utilização bastante recomendável, em substituição ao cimento em concretos.

Isaia (1992) mostra que além dos fatores econômicos e ecológicos a cinza volante proporciona, ao concreto fresco, diminuição na água requerida para determinado abatimento, incrementa a coesão e a trabalhabilidade, diminuindo a exudação e a segregação. Para o concreto endurecido as reações pozolânicas fixam o hidróxido de cálcio, aumentando a resistência, a longo prazo, pelo refinamento dos poros da pasta. Produz portanto um concreto de menor permeabilidade e maior durabilidade, com maior resistência à penetração de cloretos, ao ataque de sulfatos e as reações álcali-agregado.

Os concretos com cinza volante apresentam um crescimento mais lento da resistência, apresentam também uma maior sensibilidade ao teor de umidade nas idades iniciais, necessitando de cura mais prolongada.

A adição de altos teores de cinza volante também rebaixa o pH da solução dos poros.

Conforme Metha apud Isaia (1995) as reações pozolânicas entre a cinza volante e a pasta de cimento ocorrem:

a) logo após a mistura com a água forma-se uma película impermeável ao redor das partículas, não ocorrendo nenhuma reação até que haja disponibilidade de hidróxidos alcalinos ou de cálcio e íons sulfato, em concentração suficiente na solução da fase de contato;

b) ocorrendo o anterior, os íons hidróxidos ativam a hidratação dos aluminossilicatos vítreos;

c) por fim, prosseguem as reações pozolânicas consumindo hidróxido de cálcio e formando silicatos de cálcio hidratados, enquanto houver disponibilidade de cal.

A estrutura das pastas com cinza volante apresentam menor teor de Portlandita e maior teor de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), cristais de hidróxido de cálcio (CH) mais finos e melhor distribuídos, C-S-H com menor relação C/S, menor porosidade e menor permeabilidade e mesoporos substituídos por poros menores, segundo Massazza apud Isaia (1995).

Para Isaia (1992), as cinzas volantes em altas taxas, ao atuarem como material cimentante, melhoram as características do concreto fresco em maior grau, possibilitando incremento da durabilidade das estruturas, com menor custo.

### **3.3 CAL HIDRATADA**

A cal é obtida da calcinação de rochas de calcários/dolomitos, podendo ser produzida desde fornos rudimentares até em fornos de alta tecnologia.

A calcinação resulta na formação de dois produtos, a cal e o dióxido de carbono.

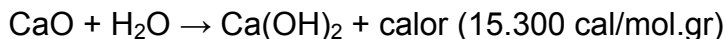
A qualidade química da cal depende das características e das impurezas contidas na rocha. A cal pode ser cálcica, quando possui elevado teor de óxido de cálcio; pode ser dolomítica quando possui elevado teor de óxido de magnésio e pode ser magnésiana quando possui teores de óxido de magnésio intermediário entre a cal cálcica e a dolomítica.

A cal calcinada é ainda cal virgem, e para a sua utilização na construção civil, deve sofrer a reação de hidratação para tornar-se cal hidratada.

#### **3.3.1 PROPRIEDADES DA CAL HIDRATADA**

A cal hidratada tem sua composição variável, de acordo com a cal virgem que lhe deu origem.

A reação de hidratação da cal com a presença de água para as cales cálcicas pode ser expressa pela seguinte reação:



Para a hidratação completa da cal virgem com alto teor de cálcio são necessários, estequiometricamente, 32,1% de água, e da água adicionada parte se incorpora a moléculas de hidratos:

no  $\text{Ca(OH)}_2$  -24,3%,

no  $\text{Mg(OH)}_2$  - 30,88%,

no  $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{MgO}$  - 15,75%

no  $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{Mg(OH)}_2$  -27,21%,

Outra parte da água constitui a umidade e hidratos de outros elementos químicos ou minerais, segundo Guimarães, (1997).

A cal hidratada apresenta partículas de hidróxido de cálcio puro, tem cor branca, e cristaliza-se com forma hexagonal, em placas lamelares ou prismas.

As suas arestas básicas têm 3,5844 Å para o hidróxido de cálcio.

Autores atribuem a massa específica para a cal com alto teor de cálcio entre 2,3 e 2,4 Kg/dm<sup>3</sup>, segundo Guimarães, (1997).

A cal em estado de pasta aumenta o seu volume, devido à capacidade da cal de absorver e reter volume de água além da água estequiometricamente combinada. A variação dos limites de aumento de volume de cal hidratada pelo processo úmido é em média de 2,2 vezes o volume desta cal seca, conforme Guimarães,(1997).

A capacidade de retenção de água das argamassas está relacionada com a quantidade de cal hidratada, conforme Boyton & Gutschick apud Guimarães (1997), de acordo com a ilustração da figura 14.

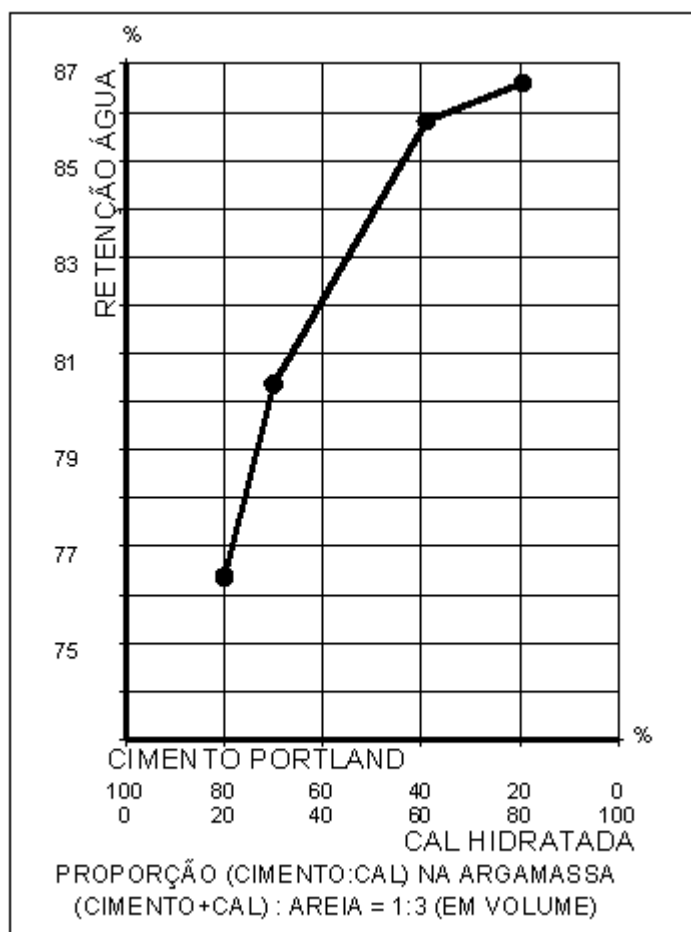


Figura 14 – Relação entre a composição das argamassas e a retenção de água (BOYTON & GUTSCHICK APUD GUIMARÃES, 1997)

A cal tem a propriedade de retenção de água, que se constitui numa medida indireta da plasticidade e relaciona-se com a trabalhabilidade. Assim, as cales altamente plásticas tem alta capacidade de retenção de água.

A propriedade de incorporação de areia justifica o emprego de cal em argamassas, visto a cal ter maior poder de incorporação do que o cimento Portland.

Conforme Guimarães(1997) a cal incorpora areia na proporção de 1:3 a 4 contra 1:2 a 2,5 de incorporação de areia do cimento.

Durante o endurecimento as partículas finas de hidróxidos se cristalizam, aumentando em número e tamanho, à medida que a água evapora.

Estes cristais se entrelaçam formando uma malha resistente.

### 3.3.2 A CAL NO CONCRETO

A cal é um produto largamente utilizado na construção civil. Mas a sua utilização restringe-se a revestimentos, incorporada em argamassas para rebocos e emboços, ou para a pintura.

Registros históricos mostram a utilização da cal em estruturas de "concreto", onde a cal exercia a função do cimento. Estes registros são de 100 a.C, em Colônia, na Alemanha, onde um aqueduto romano foi construído com argamassa de cal hidráulica, areia de rio e calcário cálcico britado, segundo Quarry Manager's Journal, vol.18, n.º3, 1935 apud Guimarães (1997); e no ano de 1d.C, o Pantheon Romano, o Coliseu, a basílica de Constantino e o aqueduto-ponte Pont du Gard, no sul da França, foram construídos com mistura de material arenoso da região de Pozzuoli, que misturado a cal, cascalho e água se tornava rígido, segundo Architecture, Marco Vitruvius Pollio apud Guimarães, (1997).

Relata Guimarães (1997) que no Brasil, em 1549, Thomé de Souza, 1.º Governador, ordenou a criação da primeira mineração, no Brasil, de calcário dos depósitos conchíferos da Baía de Todos os Santos, que foi a matéria prima para a fabricação da cal virgem utilizada na argamassa de construção da nova cidade.

A cal tem atualmente pouca utilização em concretos. Existem poucos trabalhos que estudam adições de cal em concretos. Atualmente tem-se diversos trabalhos sobre a utilização de cal em argamassas, pinturas, estabilização de solos e na confecção de blocos construtivos.

A cal, nestes casos, vem misturada com diversos elementos, com óleos, colas, componentes a base de celulose, para as tintas. Em argamassas a cal se alia muito bem ao cimento, na estabilização de solos tem-se a cal misturada com solos, cimentos, escória, e compostos químicos, e na confecção de blocos adicionam-se escória, cinza volante e solo.

Mira, Papadakis & Tsimas (2001) estudaram a adição de cal hidratada em concretos de cimento Portland comum, cimento Portland pozolânico e cimento Portland comum com adição de 20% de cinza volante. O teor de adição de cal utilizado foi de 10% e 20%. Os autores avaliaram o efeito des-

tas adições na resistência à compressão, no tempo de pega, na variação dimensional, na porosidade, na carbonatação e na corrosão de barras de aço imersas no concreto.

Na resistência à compressão, para concreto com cimento Portland comum, observaram uma significativa variação dos valores com adição em relação aos valores sem cal. Os concretos com pozolanas não apresentaram variações significativas de resistência. Mostra que o material pozolânico apresenta elevado teor de cálcio, sendo a adição de cal não tão significativa como seria para baixos teores de cálcio. Aos 360 dias as misturas com adição de cal apresentaram relativo aumento de resistência à compressão em relação às misturas sem cal.

Mira, Papadakis & Tsimas (2001) estudaram concretos que incorporam material pozolânico, e concluíram que os mesmos não apresentam grandes variações de resultados, e exibem um incremento estável, especialmente em idades avançadas. Isto é devido à rápida formação de C-S-H como resultado da aceleração das reações pozolânicas, com adição da cal.

Ensaio de difração de raio X mostram elevado teor de hidróxido de cálcio com adição de cal, em ensaios aos 3, 28 e 91 dias. Os concretos com adições minerais contém elevado teor de C-S-H no começo da hidratação. A rápida formação inicial de C-S-H nestes concretos com adição de cal explica a relativa melhora na resistência.

Mira, Papadakis & Tsimas observaram, também, que:

- A adição de cal de 10% sobre a massa de cimento em concreto com CP (Cimento Portland Comum) retarda o início de pega;
- Para o CPP (Cimento Portland Pozolânico), a adição de 10% acelera o início de pega;
- Para a adição de 20% de CV, a adição de 10% de cal acelera significativamente o início de pega;
- O aumento do teor de adição de cal de 10% para 20% apresenta pouca variação.

Da mesma forma a adição de cal interfere no fim de pega, retardando o tempo para CPC, e adiantando para CPP, e CPC com adição de CV, este último também em maior grau.

A adição de cal foi bastante efetiva para o CPP, e para o CPC + CV, quanto à variação dimensional, reduzindo o percentual de variação.

Para o CPC, a adição de cal provocou um pequeno aumento nesta variação.

A adição de cal reduziu as profundidades carbonatadas aos 45 dias, para as misturas de CPP e CPC + CV, para esta em maior grau. Ainda assim, o CPC apresentou menor profundidade carbonatada, conforme figura 15.

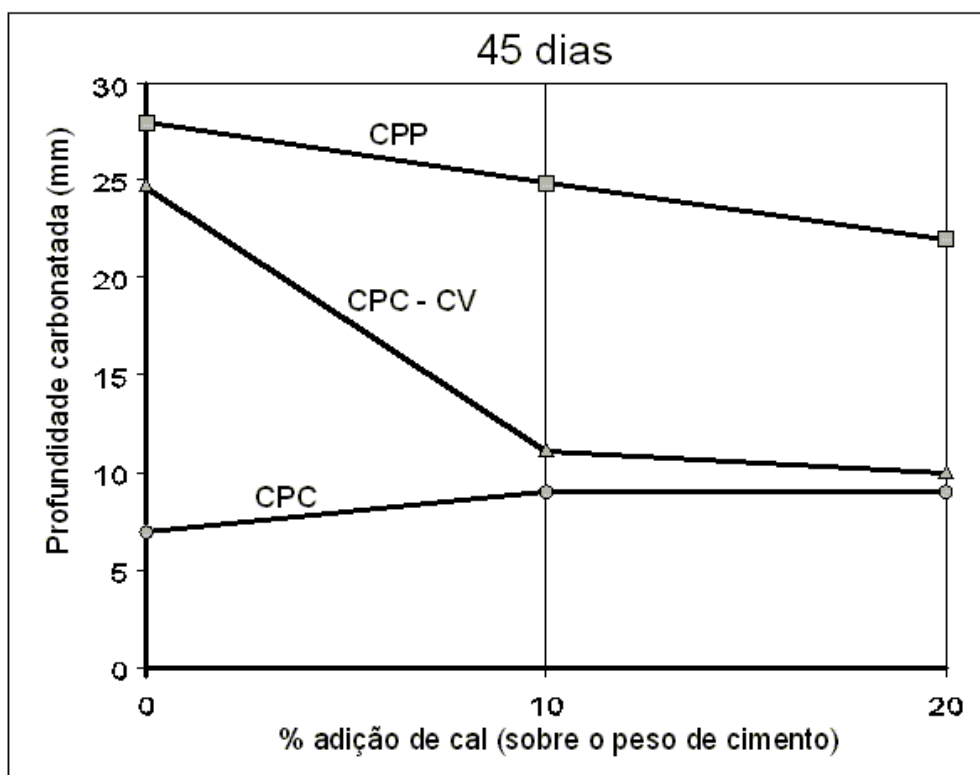


Figura 15 – Profundidades carbonatadas em concretos com adição de cal (MIRA, PAPADAKIS & TSIMAS, 2001)

A adição de cal provocou um aumento significativo na porosidade do concreto com CPC, e reduziu para o CPC + CV. Para o CPP a diminuição foi pouco significativa.

Mira, Papadakis & Tsimas concluíram que quando a cal hidratada é adicionada em concretos que contenham materiais pozolânicos, um significativo incremento na durabilidade é observado.

Uma estrutura mais densa é criada, que é responsável pela diminuição na carbonatação do concreto, e na corrosão das armaduras frente ao ataque de cloretos.

Os resultados são positivos quando utilizada a cal como uma adição aos concretos que possuam materiais pozolânicos na mistura.

Cook & Suwanvtaya (1983) estudaram pastas de cal com cinza de casca de arroz, com proporções de 1:4, 1:1,5; 1:0,67; e 1:0,25. Concluíram que o desenvolvimento da resistência é inicialmente muito rápido, mas cessa aos 28 dias. As maiores resistências foram para a mistura 1:1,5. A presença de mais de 20% de carbono, em massa, sobre a cinza de casca de arroz, não influenciou significativamente o desenvolvimento da resistência.

A estrutura do gel das misturas era composta basicamente por silicato de cálcio hidratada C-S-H (tipo II), e nas misturas com altos teores de cal, havia hidróxido de cálcio. Os autores sugerem como mistura mais conveniente é o traço de 1:1 de cinza de casca de arroz e cal.

### **3.3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A utilização de altos teores de adições minerais em concreto tem um inconveniente, que é o aumento na velocidade de neutralização do pH da camada de cobrimento do concreto, o que pode levar a processos de corrosão das armaduras.

As adições minerais produzem sensíveis melhorias em outros quesitos, como porosidade e diâmetro dos poros, calor de hidratação, penetração de cloretos e estabilidade dimensional.

A cal hidratada, composta basicamente de hidróxido de cálcio, tem diversas propriedades, como retenção de água, aumento de volume com a sua cristalização, provocando um maior entrelaçamento das partículas, diminuindo a permeabilidade das pastas de cal.



A adição da cal hidratada em concretos com altos teores de adições minerais procura suprir a reserva alcalina perdida pela substituição de cimento por adições minerais, assim como produzir uma pasta com menor porosidade.

## **DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

Desde as mais remotas eras que o homem estuda os fenômenos que o cercam no intuito de compreendê-los e comprová-los. Um dos meios utilizados são pesquisas experimentais que, de um modo geral, procuram validar os modelos teóricos através de ensaios experimentais. Para tanto, os valores obtidos devem ser o mais próximo possível da realidade, o que justifica a padronização na aplicação dos métodos e técnicas de ensaio.

Todo experimento deve ser repetido com sucesso para sua comprovação. A partir deste princípio básico, esta pesquisa procurou desenvolver uma metodologia de ações que possibilitasse a confirmação dos resultados obtidos por qualquer outro pesquisador.

Cientificamente, as pesquisas representam um aumento do saber, havendo a necessidade de estudos aprofundados sobre os assuntos em questão, nunca chegando a ser total o conhecimento sobre este ou aquele fenômeno. Especificamente em relação aos concretos, estes sempre necessitarão dotar as armaduras de uma maior proteção contra a corrosão a um menor custo.

O trabalho e os ensaios desta pesquisa foram realizados no L.M.C.C. (Laboratório de Materiais de Construção Civil) do C.T. (Centro de Tecnologia), da U.F.S.M. (Universidade Federal de Santa Maria), em Santa Maria, RS. Esta pesquisa faz parte de um projeto mais abrangente denominado ESTUDO DA MICROESTRUTURA E DA DURABILIDADE DA CAMADA DE COBRIMENTO DE CONCRETO COM ALTOS TEORES DE POZOLANAS, já tendo sido defendidas dissertações de mestrado:

ESTUDO DA MICROESTRUTURA DA CAMADA DE COBRIMENTO DE CONCRETO COM ALTOS TEORES DE CINZA VOLANTE por Rodrigo Goettems da Silveira

ESTUDO DA PERMEABILIDADE À ÁGUA NA CAMADA DE COBRIMENTO DE PROTÓTIPOS DE CONCRETOS COM ALTOS TEORES DE CINZA VOLANTE por Simone Bassan Petry

ESTUDO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS NA CAMADA DE COBRIMENTO NO CONCRETO COM ALTOS TEORES DE CINZA por Bianca Pereira Moreira.

## **4.2 OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho foi estabelecer as diferenças existentes entre as profundidades e coeficientes de carbonatação do concreto da camada de cobertura e o do interior de peças estruturais, bem como estabelecer comparações entre concretos de referência e com cinza volante, com e sem a adição de cal hidratada. Além disso, objetivou estudar, além da influência da adição de cal hidratada sobre a carbonatação do concreto, o pH e o hidróxido de cálcio remanescente de cada profundidade das camadas de cobrimento observadas.

O projeto de pesquisa da qual faz parte a presente dissertação procura explicar como variam os principais parâmetros que governam a microestrutura e a durabilidade da camada de cobertura do concreto com altos teores de cinza volante e cal, entre a superfície da peça até a profundidade de 50 mm, posição limite em que, geralmente, a armadura se encontra.

Nesta pesquisa, foram estudados traços de concreto com cinza volante e relações a/mc que variam de 0,4 a 0,8, obtendo resistências que variaram de 15 à 70 MPa. Com isso, a faixa de concretos estudados foi bastante ampla, com traços que podem ser enquadrados como concreto convencional e outros como concreto de alta resistência.

## **4.3 VARIÁVEIS ESTUDADAS**

As variáveis estudadas nesta investigação são:

Variáveis independentes: são aquelas inerentes à natureza do concreto, influenciando na compacidade do material. Nesta pesquisa, as variáveis classificadas nesta categoria são:

relações a/ag (em massa): 0,45 e 0,8 para os traços de referência e 0,40 e 0,75 para os traços com adição de CV com e sem cal, para os ensaios de carbonatação e hidróxido de cálcio remanescente.

misturas aglomerantes: referência, (50% de cinza volante + 50% de cimento), (50% de cinza volante + 50% de cimento + 20% de cal);

profundidade da camada de cobrimento a partir da superfície:

- Camada 1: de 0,0 mm à 10,0 mm;
- Camada 2: de 25,0 mm à 35,0 mm;
- Camada 3: de 50,0 mm à 60,0 mm.

Variáveis intervenientes: são aquelas que, de uma ou outra maneira, modificam as variáveis dependentes e não são controláveis, a saber:

tipo de adição mineral: cinza volante;

teor da substituição de cimento por pozolana: 50%;

adição aglomerante : cal;

teor de adição de cal: 20% em massa.

Variáveis dependentes: são assim denominadas as variáveis diretamente influenciadas por alguma variável independente, quais sejam:

Resistência à compressão

Profundidade de carbonatação;

Teor de hidróxido de cálcio remanescente.

Cabe salientar que as variáveis acima citadas foram estudadas para cada uma das três profundidades da camada de cobertura (camada 1, camada 2 e camada 3).

#### **4.4 MATERIAIS UTILIZADOS**

Os materiais estudados nesta pesquisa passaram por ensaios laboratoriais, de acordo com as normas pertinentes, para a determinação de suas propriedades físicas e químicas, o que permite a realização de outras pesquisas com materiais de características semelhantes, seguindo os mesmos

experimentos e, conseqüentemente, permitindo a comparação de resultados.

#### **4.4.1 MATERIAIS CIMENTÍCIOS**

A seguir estão descritos os ensaios e as características físicas e químicas dos materiais cimentícios utilizados nesta pesquisa.

##### **4.4.1.1 CIMENTO**

Os ensaios de caracterização física e química do cimento, tabela 2, foram realizados de acordo com as seguintes normas:

Finura # 0,075 mm – NBR 11579

Tempo de pega – NBR 11581

Análise química – NBR 5743, 5744, 5745, 5747, 7227 e 9203

Superfície específica Blaine – NBR 7224

Massa específica – NBR 6474, NM 23

Resistência à compressão da argamassa normal – NBR 7215

Para este estudo, foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial (ARI) CP V, em conformidade com a EB-NBR 5733, escolhido por fornecer maior teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  após a hidratação, devido à maior quantidade de  $\text{C}_3\text{S}$  (silicato tricálcico) em sua composição, e por conter maior quantidade de clínquer e conseqüente menor teor de adições em sua composição.

Tabela 2 – Características físicas e químicas do cimento

<b>Cimento</b>	<b>CPV-ARI</b>
Resistência (MPa) – 1 dia	28,0
Resistência (MPa) – 3 dias	33,5
Resistência (MPa) – 7 dias	41,3
Resistência (MPa) – 28 dias	50,4
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,16
Finura Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	436
Finura # 0,075 mm (%)	0,3
Tempo de início de pega (min.)	144
Tempo de fim de pega (min.)	225

#### **4.4.1.2 POZOLANA**

A caracterização físico-química das adições minerais deu-se através dos seguintes ensaios:

Massa específica – NBR 6474

Finura # 0,075 mm – NBR 11579

Superfície específica Blaine – NBR 7224

Análise química – procedimento IPT

A pozolana utilizada como substituição ao cimento foi a cinza volante (CV) moída, com massa específica de 2,10 g/cm<sup>3</sup>, e superfície específica de 361 m<sup>2</sup>/kg proveniente da usina termoelétrica de Candiota e que foi utilizada em substituição à massa percentual de cimento Portland.

Após o recebimento da cinza, procedeu-se nova moagem em um moinho de bolas, por 30 minutos. A moagem da cinza justifica-se pelo fato de se obter, com uma cinza mais fina, uma maior superfície específica das partículas.

#### **4.4.1.3 CAL**

Para a cal hidratada, quadro 1, os seguintes ensaios de caracterização foram realizados:

Retirada e preparação da amostra – NBR 6471

Análise química – NBR 6473

Massa específica – NBR 6474

Finura por peneiramento – NBR 9289

Superfície específica Blaine – NBR 7224

Nos traços com adição de cal, foi utilizada cal hidratada industrializada do tipo cálcica (maior teor de cálcio), com massa específica de 2,34 g/cm<sup>3</sup>.

Quadro 1 – Composição química dos aglomerantes e pozolanas

Composição química	Teor em massa (%)		
	CPV-ARI	Cinza Volante	Cal Hidratada
Perda ao Fogo	3,0	1,2	26,1
SiO <sub>2</sub>	19,3	64,6	0,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,7	27,3	0,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,0	2,2	0,2
CaO	63,4	1,5	73,1
MgO	1,8	0,8	0,4
SO <sub>3</sub>	3,1	0,1	0,2
Na <sub>2</sub> O	0,1	0,1	0,1
K <sub>2</sub> O	0,8	1,5	

#### 4.4.2 AGREGADOS

A obtenção das características física dos agregados baseou-se nos ensaios normalizados citados abaixo.

Composição granulométrica – NBR 7217 – NM 248

Massa específica do agregado miúdo – NBR 9776 – NM 52

Massa específica do agregado graúdo – NBR 9937 – NM 53

Absorção de água do agregado graúdo – NBR 9937

Massa unitária solta – NBR 7251

Abrasão Los Angeles – NBR 6465

Índice de forma pelo método do paquímetro – NBR 7809

Massa unitária compactada – NBR 7810

Inchamento do agregado miúdo – NBR 6467

#### 4.4.2.1 AGREGADO MIÚDO

O agregado miúdo utilizado foi areia natural de origem quartzosa, proveniente do município de Santa Maria – RS, peneirada na peneira 4,8 mm, seca em estufa e armazenada em caixas de madeira com tampa. Quadro 2.

#### 4.4.2.2 AGREGADO GRAÚDO

O agregado graúdo era proveniente de rocha diabásica britada, lavada e classificado como brita 1 que foi peneirada, utilizando-se a fração passante na peneira 19,0 mm e retida na peneira 6,3 mm. Posteriormente foi lavada, seca em estufa e estocada em caixa de madeira fechada, os resultados podem ser vistos no quadro 2. Este agregado procede do município de Itaara, RS.

Quadro 2 - Características físicas dos agregados

Ensaio	% retida dos agregados	
	Brita 1	Areia zona 3
Análise Granulométrica		
Peneiras (mm)		
19,0	1	---
12,5	36	---
9,5	76	---
6,3	98	---
4,8	100	0
2,4	100	1
1,2	100	3
0,6	100	20
0,3	100	74
0,15	100	90
< 0,15	100	100
Módulo de Finura	6,77	1,88
Diâmetro máximo (mm)	19,00	1,2
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,49	2,63
Massa unitária solta (kg/dm <sup>3</sup> )	1,28	1,65
Massa unitária compactada (kg/dm <sup>3</sup> )	1,40	---
Absorção de água (%)	1,60	0,50
Índice de forma	2,93	---
Abrasão Los Angeles (%)	18,80	---
Coefficiente de inchamento médio	---	1,31
Umidade crítica (%)	---	2,1



### **4.4.3 ADITIVO QUÍMICO**

O abatimento especificado foi  $100 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ . Quando necessário, para atingir este abatimento sem variações na relação água/aglomerante de cada traço, foi utilizado o aditivo superplastificante GLENIUM 51 da MBT. A determinação da dosagem inicial de aditivo superplastificante a ser utilizada, nos concretos investigados, deu-se através de ensaios de trabalhabilidade para cada mistura aglomerante e relação a/mc. Estes resultados serviram de parâmetro para as moldagens definitivas.

GLENIUM 51 é um aditivo com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado, isento de cloretos, com pH de 5 à 7 e teor de sólidos médio de 30%. A adição deste produto foi feita de acordo com as especificações da empresa fabricante.

## **4.5 DOSAGEM DO CONCRETO**

Os teores de adições minerais utilizados nesta pesquisa baseiam-se em trabalhos anteriores, produzidas pelo Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON), os quais comprovaram a viabilidade na substituição do cimento por teores de até 50% de cinza volante. Nas misturas com cal, esta adição foi feita com a intenção de fornecer à mistura um maior teor de hidróxido de cálcio (CH), visto que este composto reage com a sílica da cinza volante, formando novas fases de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

A dosagem foi realizada com o objetivo de manter a trabalhabilidade constante para os três traços de cada tipo de mistura. Adotou-se como traço inicial o R45 com teor de argamassa igual a 52%, R60 com 52,7% e R80 com 53,8%, todos em massa, que foram os teores que deram a melhor trabalhabilidade para cada um deles. A partir destes valores, transformou-se os teores de argamassa, de massa para volume, com a finalidade de manter aproximadamente constante este teor para uma mesma família de traços, ajustando-se as diferenças através da correção do volume de areia adicionada. Com este procedimento, diminuiu-se as diferenças entre o traço de referência com os de cinza volante, com ou sem cal, como pode ser observado na tabela 3.

Tabela 3 – Teor de argamassa em massa e em volume dos traços empregados

<b>Traço</b>	% arg. (massa)	% arg. (volume)
R45	<b>52,0</b>	<b>49,0</b>
CV40	49,8	48,8
CV40c	49,0	48,3
R60	<b>52,7</b>	<b>50,1</b>
CV55	50,4	49,3
CV55c	49,8	49,0
R80	<b>53,8</b>	<b>51,6</b>
CV75	52,5	51,5
CV75c	52,2	51,2

Para o proporcionamento da pozolana, foi substituída a massa equivalente de cimento pela cinza volante, de acordo com o traço. A cal foi considerada uma adição com teor de 20% em massa.

Com o intuito de aproximar as resistências à compressão nas idades estudadas dos traços de referência com os traços com adições, a relação a/ag destes últimos foi tomada com um valor de 0,05 menor que seus correspondentes sem adições, respectivamente 0,8, 0,6 e 0,45 para os traços de referência e 0,75; 0,55 e 0,4 para os traços com CV. Esta estratégia foi implementada para que as regressões realizadas com as respectivas equações de Abrahms, para o estudo em igualdade de resistência, apresentassem somente valores interpolados dentro dos valores limites observados nos ensaios, ou com pequenas extrapolações.

Cabe salientar que o teor de sólidos do aditivo utilizado é de 30%, logo, somente 70% da quantidade empregada no traço foi deduzida da água de amassamento.

A quantidade de materiais por m<sup>3</sup> se encontra na tabela 4.

#### **4.5.1 NOMENCLATURA UTILIZADA**

Adotou-se a seguinte nomenclatura para os traços:

NOME	a/mc	COMPOSIÇÃO
R45	0,45	Referência
R60	0,60	Referência
R80	0,80	Referência
CV40	0,40	50% Cimento Portland + 50% CV
CV55	0,55	50% Cimento Portland + 50% CV
CV75	0,75	50% Cimento Portland + 50% CV
CV40C	0,40	50% Cimento Portland + 50% CV + 20% cal hidratada
CV55C	0,55	50% Cimento Portland + 50% CV + 20% cal hidratada
CV75C	0,75	50% Cimento Portland + 50% CV + 20% cal hidratada

Tabela 4 – Quantidade de materiais por m<sup>3</sup> de concreto

Traço	a/mc	Materiais Cimentícios (kg/m <sup>3</sup> )	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Cinza volante (kg/m <sup>3</sup> )	Cal (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Água (l/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )
REF	0,45	427	427	-	-	1025	683	192	-
REF	0,60	319	319	-	-	1004	801	191	-
REF	0,80	238	238	-	-	977	899	190	-
CV	0,40	482	241	241	-	1075	491	192	1,45
CV	0,55	348	174	174	-	1054	656	191	0,29
CV	0,75	254	127	127	-	1004	807	190	0,42
CVc	0,40	560	280	280	112	1057	221	222	1,93
CVc	0,55	404	202	202	81	1031	451	221	0,93
CVc	0,75	294	147	147	59	977	649	221	-

#### 4.6 MOLDAGEM DOS PROTÓTIPOS

Para esta pesquisa, optou-se por moldar protótipos prismáticos de 70x20x15 cm, com a intenção de aproximar o estudo de laboratório com uma viga estrutural de uma obra, e avaliar o desempenho dos testemunhos extraídos destes protótipos em relação às variáveis de estudo.

Para a moldagem dos protótipos, desenvolveu-se uma armação metálica, presa e regulada por parafusos, que dá rigidez às faces da fôrma. A fôrma em si é composta de cinco chapas de compensado naval de 15 mm de espessura, encaixadas dentro da armação metálica. (figura 16)



Figura 16 – Formas utilizadas na moldagem dos protótipos

Para facilitar a desforma, foi aplicada uma fina camada de óleo queimado (desmoldante) nas faces internas das fôrmas. As frestas entre as juntas das chapas de compensado foram vedadas com fita adesiva, para evitar que houvesse vazamento da pasta de cimento, durante as moldagens, como pode ser visto na figura 17.



Figura 17 – Preparação das formas para moldagem

Antes da moldagem dos protótipos e dos corpos-de-prova (CPs), foram realizados ensaios de trabalhabilidade com cada traço, onde foi verificado o abatimento das misturas. As misturas definitivas foram executadas em uma betoneira de eixo inclinado, com as proporções de material encontradas no cálculo dos traços.

Para cada traço, foram moldados seis protótipos, sendo que um deles, escolhido aleatoriamente, foi utilizado nesta dissertação, e os demais foram utilizados nas demais dissertações integrantes do projeto global de pesquisa. Foram moldados ainda, para cada traço, quatro corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, adensados em mesa vibratória. Estes corpos-de-prova foram desmoldados após vinte e quatro horas, identificados e armazenados em uma câmara úmida com temperatura e umidade controladas em  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e 95% de umidade relativa, para serem curados até as idades de ensaio.

Os protótipos foram moldados em três camadas, sendo que cada camada foi vibrada com um vibrador de imersão com agulha de 2,5 mm de diâmetro, (figura 18).



Figura 18 – Protótipos sendo vibrados

Após a moldagem, a face superior dos prismas foi mantida úmida com sacos de aniagem saturados em água. Depois de 24 horas, foi efetuada a desforma dos prismas, que foram imediatamente colocados dentro de sacos de aniagem e armazenados ao abrigo do sol e vento. Estes sacos de aniagem foram mantidos úmidos durante sete dias, figura 19. Cabe enfatizar que, durante as moldagens, não houve grandes variações de temperatura e umidade relativa do ar.



Figura 19 – Cura em sacos de aniagem

Após este período, os protótipos foram colocados ao ar livre, por 49 dias com seu eixo longitudinal orientado no sentido norte-sul, apoiados com a face de 20x70 cm sobre roletes de concreto, conforme pode ser visto na figura 20.



Figura 20 – Cura dos protótipos ao ar livre

Desta forma, os prismas ficaram armazenados até a data das extrações dos testemunhos para o ensaio de carbonatação acelerada e perfuração para retirada do pó para os ensaios de hidróxido de cálcio remanescente.

## **4.7 ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA**

### **4.7.1 INTRODUÇÃO**

As profundidades de estudo da camada de cobertura foram:

Camada 1: de 0,0 mm à 10,0 mm;

Camada 2: de 25,0 mm à 35,0 mm;

Camada 3: de 50,0 mm à 60,0 mm.

Os corpos-de-prova moldados eram cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura e os protótipos prismáticos, com dimensões de 75x20x15 cm e de cada um foram extraídos 6 testemunhos cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. (figuras 21 e 22)

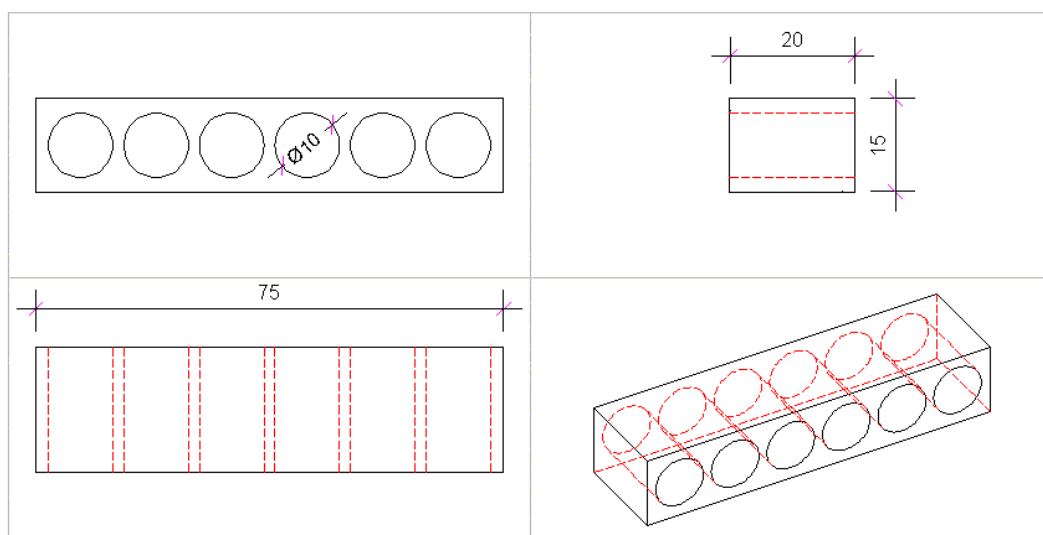


Figura 21 – Dimensões dos protótipos



Figura 22 – Extração de corpos-de-prova dos protótipos

Os testemunhos extraídos dos protótipos foram cortados para estudo em diferentes profundidades, (figuras 23 e 24).





Figura 23 – Corte dos corpos-de-prova

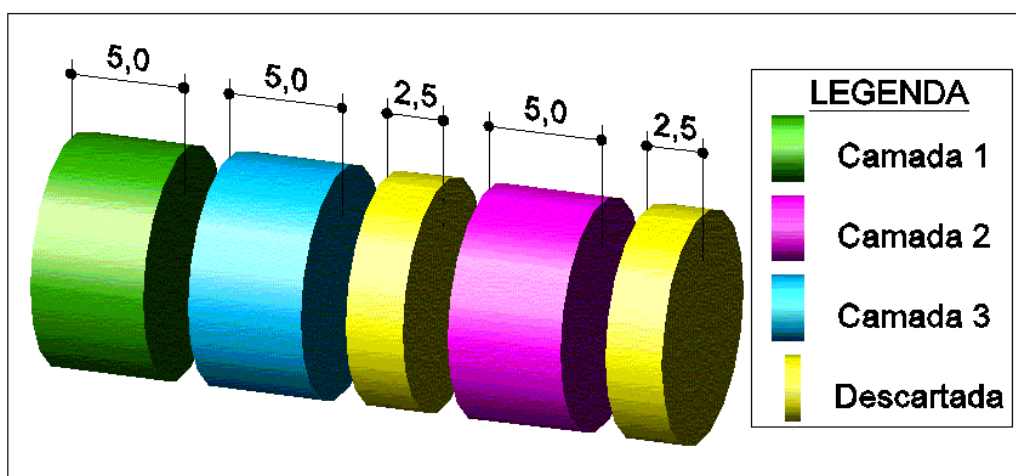


Figura 24 – Esquema de corte dos corpos-de-prova (unidade: cm)

#### 4.7.2 PRÉ-CONDICIONAMENTO

Para o ensaio de carbonatação acelerada os corpos-de-prova sofreram pré-condicionamento, conforme preconiza a norma RILEM TC 116-PCD (1999) visando dotar os corpos-de-prova de uma concentração de umidade em equilíbrio e com distribuição uniforme de água evaporável. A sala climatizada possuía  $(75 \pm 2)\%$  de umidade relativa e temperatura de  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$  e com uma distribuição uniforme da água evaporável no corpo-de-prova.

Partindo-se da idade escolhida para o ensaio (91 dias), adotou-se o tempo de cura ambiental de 49 dias, conforme esquema proposto por Frizzo (2001): subtrair-se, da idade de ensaio, de forma retroativa, os prazos necessários para a realização do experimento. As fases do mesmo e seus prazos estimados são: redistribuição da umidade (14 dias), pré-secagem (10 dias), determinação dos parâmetros de pré-secagem (10 dias), selagem lateral (3 dias), corte (1 dia), havendo um excesso de 4 dias para possíveis imprevistos, que eram acrescentados ao período de redistribuição da umidade quando não utilizados.

Do prisma moldado foram extraídos três testemunhos que foram serrados de modo a obter-se três testemunhos circulares com altura de 5cm e diâmetro de 10cm para cada camada pesquisada, ou seja, nove testemunhos por ensaio de cada traço, além dos testemunhos utilizados para gerar os parâmetros de pré-condicionamento, que foram retirados de outro prisma, tendo sido ambos moldados na mesma oportunidade, com o mesmo concreto e submetidos as mesmas condições de cura e armazenamento. Os testemunhos a serem ensaiados foram identificados, pesados e pintados na face lateral e na face inferior com três demãos de verniz poliuretânico, tornando-se impermeáveis nestas superfícies. A face superior foi mantida “in natura” de modo a permitir o fluxo de CO<sub>2</sub> no sentido axial, figura 25. Após foram estocados na sala climatizada até o início da pré-secagem controlada.



Figura 25 – Aplicação de verniz na lateral e na face inferior

Os parâmetros de pré-condicionamento foram obtidos com dois testemunhos, um colocado em estufa à 105°C, até atingir constância de massa, com variação de 0,5g em 24h, o que acontecia num intervalo de tempo variável de 3 à 10 dias. O outro testemunho era triturado até se obter uma massa próxima à 650g com partículas de tamanho variável entre 5mm e 2mm. A seleção deste material era feita com peneira e o mesmo era colocado em bandeja na sala climatizada até atingir massa estável com variação máxima de 0,1g, em sucessivas pesagens diárias, demandando um tempo aproximado de 3 à 5 dias, (figura 26).



Figura 26 – Pré-condicionamento

Após, a bandeja com material era levada a estufa a 105°C e, a cada 24h, era realizada a pesagem, até obter-se massa constante com variação máxima de 0,1g, o que ocorria em 3 ou 4 dias.

A seguir calculava-se as concentrações de água evaporável total e a concentração da umidade de equilíbrio a 75% de umidade relativa do ar, determinando-se a variação de massa dos corpos-de-prova para a pré-secagem, (figura 27).



Figura 27 – Estufa para pré-secagem

A variação de massa necessária era atingida através de molhagens ou da colocação do testemunho em estufa ventilada, a 50°C, com monitoramento diário, sendo permitida uma variação máxima de 5% em relação a diferença determinada; esta etapa demandava de 1 a 7 dias.

Na próxima etapa, realizava-se a selagem dos corpos-de-prova em camadas seqüenciais de filme de polietileno (PVC), (figura 28).



Figura 28 – Embalagem em filme de polietileno

E sobre o filme de polietileno, dois sacos de polipropileno selado à quente e ainda, um saco de filme de polietileno e alumínio, utilizado em indústrias de moagem de café, (figura 29).



Figura 29 – Embalagem em saco de polietileno e alumínio

Deste modo ficava impedida a perda de massa dos testemunhos, por evaporação, durante a fase de redistribuição da umidade que consistia em

manter os mesmos por um período mínimo de 14 dias, à temperatura de 50°C, sem trocas externas, (figura 30).



Figura 30 - Estufa a 50°C para redistribuição da umidade

A temperatura de 50° C acelera a redistribuição do gradiente de umidade axial no sentido de obter-se uma distribuição homogênea da umidade por todo o corpo-de-prova.

Manteve-se os corpos-de-prova nesta situação até 24h antes do ensaio e então transferiu-se os mesmos para a sala climatizada, sendo mantidos selados até o momento de realização do ensaio.

#### **4.7.3 CÂMARA DE CARBONATAÇÃO**

No ensaio de carbonatação acelerada, simulou-se uma atmosfera com teor de 5% de CO<sub>2</sub> e 75% de U.R, e foi realizado conforme a RILEM CPC - 18, em câmara climática automatizada, modelo 345 da marca FANEM, (figura 31).



Figura 31 – Câmara climática automatizada

O teor elevado de CO<sub>2</sub> permite realizar o ensaio em um tempo muito menor do que se o ensaio fosse realizado em uma atmosfera com teor normal de gás carbônico.

Se considerarmos que as amostras estivessem expostas a uma atmosfera urbana, de 0,3% de concentração de gás carbônico, a mesma profundidade de carbonatação alcançada com o teor de 5% de CO<sub>2</sub>, em 12 semanas de ensaio, seria alcançada apenas com 200 semanas, ou seja, em um período superior a 4 anos, conforme equação proposta por Neville (1997).

Teoricamente, os ensaios de carbonatação acelerada podem ser utilizados para determinar o período de tempo que levaria para se alcançar a mesma profundidade carbonatada, mas com outro teor de CO<sub>2</sub>, pela relação:

$$\frac{t_a}{t_n} = \frac{C_n}{5}$$

Equação 1 –Equação que relaciona o tempo de carbonatação acelerada em relação ao tempo em condições normais. (Neville, 1997)

onde:

$t_a$  é o tempo de ensaio acelerado a 5% de concentração de  $\text{CO}_2$ ;

$t_n$  é o tempo que levaria para se alcançar a mesma profundidade carbonatada;

$C_n$  concentração de  $\text{CO}_2$  da atmosfera em %.

A umidade relativa de 75% é um teor de fácil manutenção em laboratório, no clima da região central do estado do Rio Grande do Sul.

Wolf e Dal Molin (1989) mostram que a carbonatação é máxima em umidades relativas de 70%.

Conforme demonstra Venuat apud Rosenberg (1989), umidades intermediárias entre 50% e 80% são mais propícias a ocorrência das reações de carbonatação.

O nível de saturação dos poros da pasta é um fator decisivo para o avanço da frente de carbonatação, pois a reação de carbonatação ocorre na fase líquida.

Terminado o período de pré-condicionamento, os corpos-de-prova foram retirados da estufa ( $50 \pm 2^\circ\text{C}$ ), e colocados em ambiente de  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  e 75% de U.R. por um período de 24 horas. Após esse período de resfriamento, os mesmos são colocados na câmara de carbonatação, com uma umidade de 75%, temperatura de  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  e uma concentração de  $\text{CO}_2$  de 5%.

Foi utilizado um corpo-de-prova por idade de ensaio, ou seja, três corpos-de-prova por mistura, para ensaios com 4, 8 e 12 semanas de exposição ao  $\text{CO}_2$ , (figura 32).



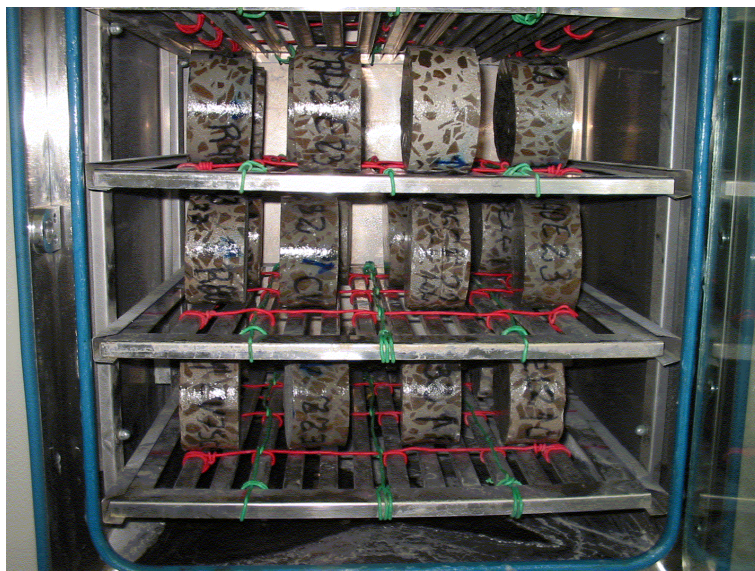


Figura 32 – Distribuição dos Corpos-de-prova na câmara climatizada

Cada vez que a câmara era aberta, para retirada de corpos-de-prova, os que permaneciam eram trocados de lugar, para que ocupassem diferentes posições dentro da câmara. A ordem de troca obedecia a seqüência de baixo para cima e da esquerda para direita e de traz para frente, ou seja, a câmara era composta de quatro grades metálicas, formando quatro níveis, cada grade era dividida em quatro linhas e quatro colunas, formando dezesseis células. A troca ocorria deslocando o corpo-de-prova para o nível superior, para coluna da direita e para linha de trás, e assim sucessivamente para todos os corpos-de-prova que permaneciam na câmara de carbonatação.

#### **4.7.4 DETERMINAÇÃO DAS PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO**

Após 4, 8 e 12 semanas os corpos-de-prova eram retirados da câmara de carbonatação, rompidos em prensa hidráulica com força de compressão diametral, para determinação da frente de carbonatação.

Para uma maior precisão no corte, foram utilizados perfis metálicos, cuidadosamente colocados no eixo de simetria do corpo-de-prova, evitando com isso que ocorresse o esmagamento da peça, e houvesse ruptura mais próximo possível do eixo da peça, conforme pode ser visto na figura 33.

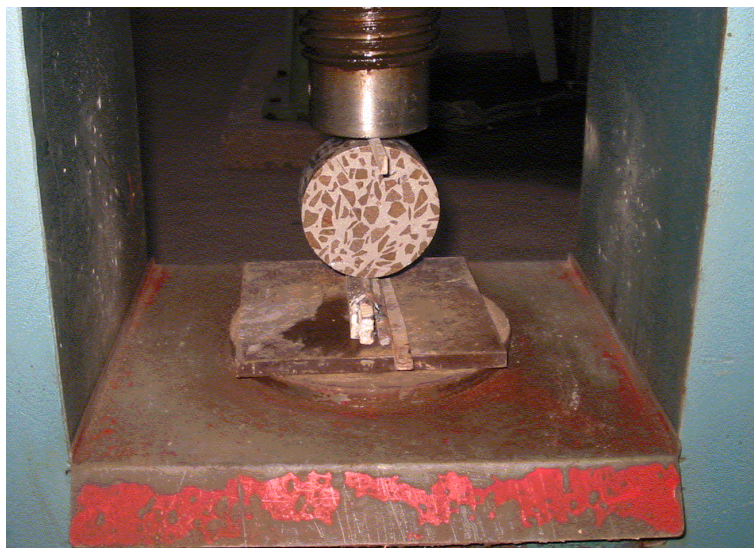


Figura 33 – Prensa para ruptura dos corpos-de-prova

As duas partes, provenientes do corpo-de-prova, foram utilizadas. Com isso foi possível medir um número maior de pontos, conseqüentemente obteve-se uma maior precisão na determinação da frente de carbonatação, (figura 34).



Figura 34 – Ruptura dos corpos-de-prova

Na figura 35, pode-se observar que após a ruptura do corpo-de-prova, asperge-se a solução de fenolftaleína em ambas as faces do corpo-de-prova para medir a frente de carbonatação.

A aspersão da solução de fenolftaleína torna o concreto não carbonatado ( $\text{pH} \geq 12$ ) vermelho-carmim e permanece incolor no concreto carbonatado ( $\text{pH} < 9$ ).



Figura 35 –Corpo-de-prova após aspersão de fenolftaleína

A solução de fenolftaleína foi dosada da seguinte forma:

- 30 gramas de álcool etílico absoluto;
- 70 gramas de água destilada;
- 1 grama de fenolftaleína em pó.

O corpo-de-prova e a profundidade carbonatada foram medidos em milímetros com paquímetro eletrônico, com duas casas decimais, (figura 36).

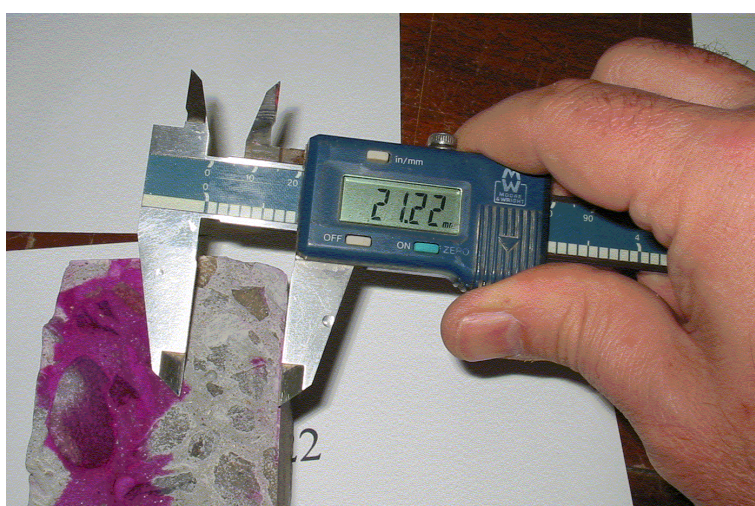


Figura 36 – Medidas com paquímetro eletrônico

Cada face do corpo-de-prova foi fotografada com câmera fotográfica digital, para posteriormente dimensionar a frente de carbonatação através das fotografias.

Para medir a frente de carbonatação utilizou-se o software AutoCAD da Autodesk, com os seguintes passos:

Inicialmente inseriu-se a foto digitalizada, do corpo-de-prova, no AutoCAD;

Colocou-se a foto na escala utilizando como unidade o milímetro, em conformidade com as dimensões do corpo-de-prova, retiradas com o paquímetro digital.

Desenhou-se uma poligonal no limite entre a área carbonatada e a área não carbonatada;

Foram desenhadas linhas, com afastamento de um milímetro, da frente de carbonatação até a face superior do corpo-de-prova, (figura 37);

O comprimento das linhas foi obtido através da rotina denominada "COTA.LSP", desenvolvida em Autolisp, que é uma linguagem de programação do AutoCAD. Esta rotina é mostrada no Anexo 1.

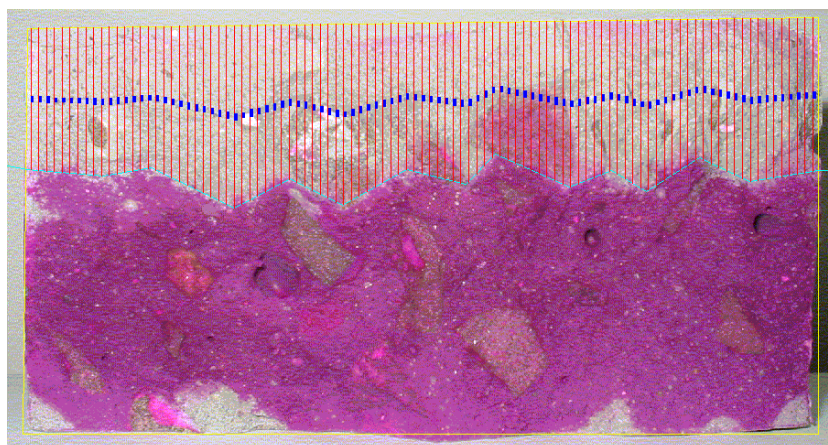


Figura 37 – Medidas da frente de carbonatação

Os dados obtidos através da rotina "COTA.LSP" são gravados diretamente em um arquivo do tipo Excel da Microsoft, onde são tratados estatisticamente.

Dos valores obtidos, aproximadamente 200 (100 para cada face do corpo-de-prova) calculou-se a média, desvio padrão e coeficiente de variação. Os valores limites, inferior e superior, eram eliminados até que o coeficiente de variação atingisse valor inferior a 5%.

#### **4.7.5 ENSAIO DO TEOR DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO REMANESCENTE**

A extração das amostras de pó para os ensaios de teor de hidróxido de cálcio remanescente se deu nos interstícios dos furos dos testemunhos nos protótipos, na idade de 91 dias, para cada traço, (figura 38).

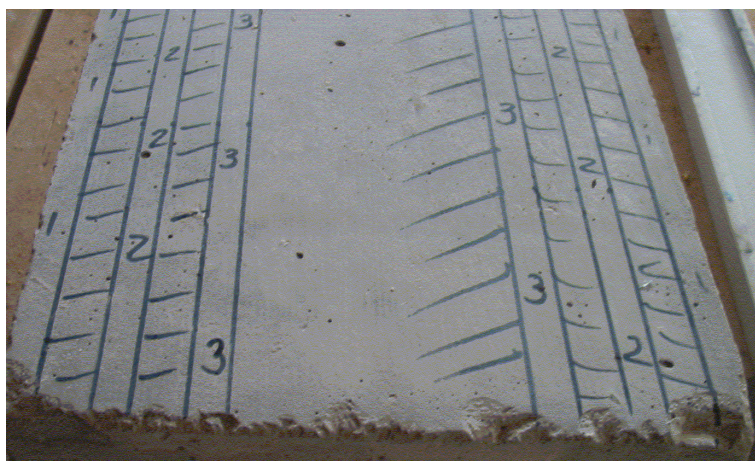


Figura 38 – Marcação das profundidades a serem estudadas

A coleta foi feita com uma furadeira de precisão com aspirador e filtro para o pó, observando-se as devidas profundidades de estudo, (figura 39).



Figura 39 – Coleta de pó com furadeira de precisão

Após a coleta, o pó foi peneirado com uma peneira de malha #200, (figura 40).



Figura 40 – Pó peneirado na peneira de malha #200

Com o uso de um almofariz, pulverizou-se a fração não passante na malha #200 e peneirou-se novamente, até obter-se uma quantidade de pelo menos 120 g de pó de cada profundidade de cada traço.

Depois deste procedimento, as amostras foram imersas em álcool etílico, a fim de paralisar as reações de hidratação do cimento. Após, as amostras foram secas em estufa à 60°C por 24 horas e armazenadas, (figura 41).

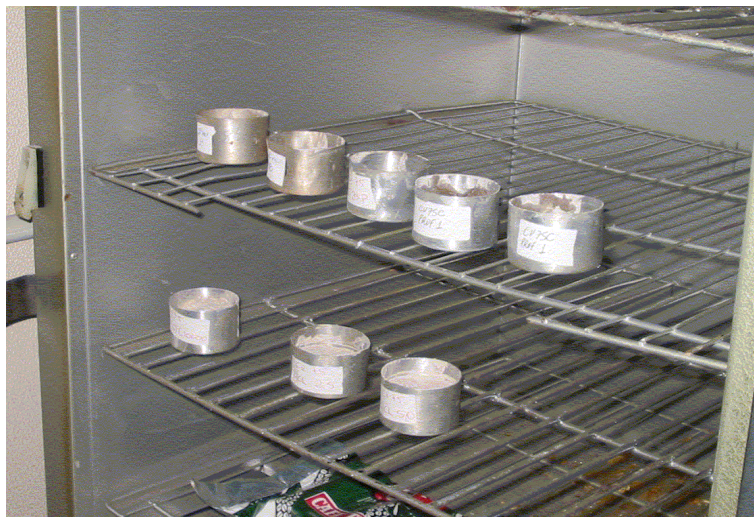


Figura 41 – Secagem das amostras em estufa à 60°C

## **ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

Os ensaios foram realizados de modo similar e independente para cada uma das seis misturas investigadas a fim de que a análise comparativa entre resultados obtidos, com os diferentes materiais cimentícios, pudesse ser realizada.

A mistura sem adições minerais, denominada referência, forneceu os parâmetros para a comparação das propriedades deste concreto com os demais.

A adição de cal hidratada e a conseqüente reposição de hidróxido de cálcio torna-se o diferencial entre as misturas, ou seja, tem-se além da mistura de referência duas outras com aglomerantes diferentes e, moldadas com e sem a incorporação de fonte externa de hidróxido de cálcio, o que propõe análises comparativas, de modo a se discutir resultados obtidos frente à durabilidade.

As análises de todos os resultados foram realizadas nas relações  $a/mc = 0,40$  e  $0,75$ , sendo que para isto utilizou-se regressão estatística pela equação de Abrahms com os resultados dos traços de referência com  $a/mc = 0,45$  e  $0,80$ .

Os valores analisados são a média dos resultados obtidos nos ensaios, com um desvio médio relativo do ensaio inferior a 5%, caso contrário, quando a dispersão foi mais elevada, foram descartados os valores discrepantes e tomados os mais coerentes.

Como o objeto de estudo deste trabalho são as três camadas do concreto de cobertura anteriormente especificadas, comparou-se os resultados dos ensaios das três profundidades de um mesmo traço e entre as diferentes misturas.

Os cálculos foram realizados diretamente por interpolação da equação de potência, entre as resistências à compressão de cada traço ( $a/mc = 0,40$



e 0,75 ou 0,45 e 0,80) com os valores obtidos, em cada camada, para os ensaios de difusividade ou absorção de água, (tabela 5).

Tabela 5 – Resistência a compressão – 91 dias

Traço	Resistência - 91d
R40*	88,9
R45	75,5
R55*	53,3
R60	44,1
R75*	32,4
R80	30,0
CV40	50,6
CV55	34,7
CV75	15,0
CV40c	57,1
CV55c	37,4
CV75c	19,5

\* valores obtidos por regressão estatística

O comportamento dos concretos em relação à resistência seguiu, de modo geral, dois princípios bem conhecidos da tecnologia do concreto: a resistência à compressão do concreto aumenta com a diminuição da relação  $a/mc$  e a adição de cinza volante promove um retardamento do desenvolvimento da resistência do concreto.

Ainda observa-se que a adição de cal ao concreto com cinza volante promoveu índices de resistência ligeiramente maiores que os traços com cinza volante sem cal, sendo este comportamento justificado pelo fato da adição de cal proporcionar maior retenção de água, que fica disponível para a hidratação e cura do concreto, resultando assim em resistências entre 8% e 27% superiores do que as obtidas nos traços sem cal.

## **5.2 ESTRUTURA DOS POROS DA CAMADA DE COBRIMENTO**

A penetração de fluidos está diretamente relacionada com o diâmetro crítico e distribuição dos poros de modo que o conhecimento destes é peça fundamental para a interpretação dos resultados. Os resultados apresentados na tabela 6 são justificados na dissertação de Silveira (2004) e são derivados de ensaio realizado com testemunhos extraídos de protótipos molda-

dos e curados juntamente com os protótipos utilizados nesta pesquisa, ou seja, são originários do mesmo concreto.

Tabela 6 – Distribuição dos poros por intrusão de mercúrio aos 91 dias.

TRAÇOS	Volume total de Hg (ml/g)	Área total poros (m <sup>2</sup> /g)	Diâmetro crítico (nm)	Porosidade total (%)	Poros Ø<10nm (%)	Poros Ø>50nm (%)
R40_1	0,0359	10,874	132	7,61	16,00	72,6
R40_2	0,0208	5,647	147	4,70	16,30	72,1
R40_3	0,0078	2,326	151	2,13	17,40	54,5
R75_1	0,0294	3,869	304	6,60	4,30	74,8
R75_2	0,0461	7,750	238	9,74	6,80	74,1
R75_3	0,0387	3,945	393	8,19	9,80	65,3
CV40_1	0,0403	13,436	120	8,02	20,00	28,0
CV40_2	0,0390	14,252	109	8,31	23,30	21,3
CV40_3	0,0574	22,375	103	11,70	30,00	11,3
CV75_1	0,0534	12,075	177	11,58	5,10	56,9
CV75_2	0,0677	12,090	224	14,17	10,20	50,1
CV75_3	0,0780	10,236	305	15,59	19,10	45,9
CV40c_1	0,0929	23,595	157	16,75	19,80	36,7
CV40c_2	0,0949	18,307	207	16,57	22,80	33,7
CV40c_3	0,0898	29,235	123	16,73	28,00	27,8
CV75c_1	0,0758	9,451	321	15,14	8,20	49,5
CV75c_2	0,0755	14,427	209	15,43	13,00	46,9
CV75c_3	0,0655	16,087	163	14,05	19,70	42,9

Observa-se, para todos os traços, que a porcentagem de poros com diâmetros maiores que 50 nm (macroporos) diminui à medida que a profundidade aumenta, fato que indica uma maior porosidade na superfície do concreto, revelando assim a existência do “efeito parede”, causado pelo acúmulo de água na interface forma/concreto.

Em relação à adição de cinza volante comprovou-se a diminuição do tamanho dos poros que a pozolana acarreta tanto por seu efeito químico como pela sua atuação como filler inerte, pois todos os traços com esta adição apresentam menor porcentagem de poros grandes (Ø>50 nm) nas três profundidades estudadas, em comparação com o traço de referência.

Em relação ao traço com cinza volante e cal, também houve um significativo refinamento da dimensão dos poros, muito acima do observado no traço de referência, porém não tão acentuado quanto no traço sem cal, com

exceção na camada 1, em que apresentou o menor teor de poros maiores que 50 nm, conforme conclusão de Petry (2004). A diminuição dos poros no traço com reposição de hidróxido de cálcio é de magnitude suficiente para garantir um bom desempenho ao concreto, lembrando que a adição da cal, por fornecer um teor elevado de hidróxido de cálcio, pode melhorar o desempenho à carbonatação.

A adição de cal hidratada às misturas de concreto, com o objetivo de repor a reserva de CH que é consumida pelas reações pozolânicas e pela redução do teor de cimento, objetivou manter um teor de CH mais elevado, do que o teor de CH das misturas sem adição de cal.

A cal hidratada, além de repor a reserva alcalina nas misturas de concreto, também proporciona uma diminuição da permeabilidade e dos poros abertos da pasta.

Mira, Papadakis & Tsimas (2001) concluíram que as adições minerais promovem uma mudança nas propriedades do concreto, e que a pasta resultante tem uma menor porosidade e um pH maior, do que a mistura sem adição de cal.

Neste estudo o teor de cal adicionada às misturas foi de 20%, e buscou-se determinar o efeito proporcionado pela cal nas misturas com adições minerais, nas seguintes relações:

- Mistura de referência x mistura com adições minerais, com e sem cal;
- Mistura com adições minerais sem cal x mistura com adições minerais com cal;

Para estas relações estudou-se, para cada camada, as seguintes correlações:

- Coeficientes de carbonatação x camadas de cobrimento;
- Teor remanescente de CH x camada de cobrimento;
- Coeficiente de carbonatação x percentagem de hidróxido de cálcio remanescente;
- Coeficiente de carbonatação x percentagem de água combinada;

- Coeficiente de carbonatação x percentagem de poros com diâmetro menor que 10 nm.

As análises e conclusões referem-se portanto à comparação direta entre as misturas com e sem cal e com as misturas de referência.

### 5.3 COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO

A determinação do coeficiente de carbonatação nas misturas investigadas indica a profundidade carbonatada em função do tempo e são expressos em  $\text{mm/semana}^{0,5}$ .

Para a determinação dos coeficientes de carbonatação utilizou-se procedimento analítico (regressão linear), sendo as profundidades de carbonatação (em milímetros) representadas no eixo y e no eixo x, a raiz quadrada da idade cronológica de permanência dos corpos-de-prova em câmara climatizada (4, 8 e 12 semanas). Para o tempo zero (data de colocação dos corpos-de-prova na câmara de carbonatação) considerou-se carbonatação nula. Construíram-se os gráficos de cada uma das misturas aglomerantes. Os pontos obtidos foram alinhados em uma reta de tendência com função identidade do tipo  $f(x) = ax + b$ , onde o coeficiente angular "a" foi considerado o coeficiente de carbonatação, como pode ser visto na figura 42.

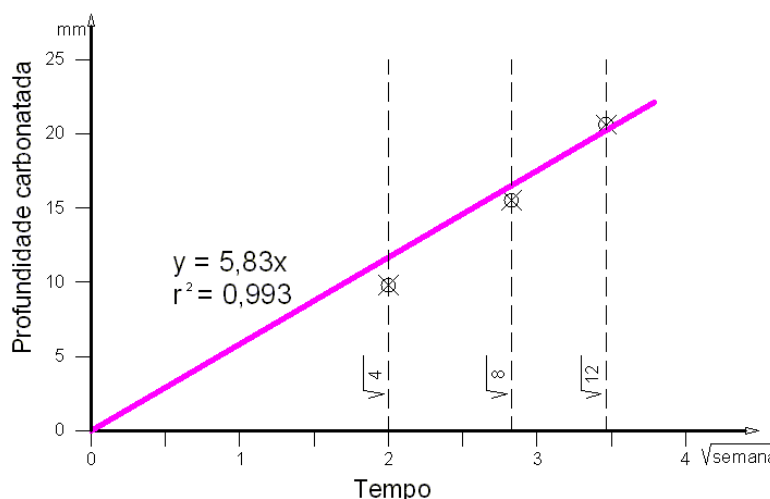


Figura 42 – Exemplo da obtenção do Coeficiente de Carbonatação

Através da tabela 7, pode-se observar os valores das profundidades carbonatadas para as três camadas estudadas, adotando-se zero para a profundidade inicial e os resultados obtidos para 4, 8 e 12 semanas, e o coeficiente de carbonatação.

Tabela 7 – Determinação do Coeficiente de Carbonatação em função da profundidade carbonatada.

TRAÇOS	0	4	8	12	K <sub>c</sub>	r
R40_1					4,68	
R40_2					4,50	
R40_3					4,10	
R45_1	0,00	9,79	15,52	20,62	5,83	0,993
R45_2	0,00	9,01	15,58	19,71	5,66	0,991
R45_3	0,00	12,30	15,06	18,11	5,24	0,994
R75_1					>15,01	
R75_2					>15,29	
R75_3					>15,22	
R80_1	0,00	27,00	>50,00	>50,00	>16,91	0,982
R80_2	0,00	31,74	>50,00	>50,00	>17,34	0,997
R80_3	0,00	32,57	>50,00	>50,00	>17,42	0,998
CV40_1	0,00	18,56	24,80	31,60	9,01	0,999
CV40_2	0,00	18,78	25,16	33,74	9,48	0,997
CV40_3	0,00	19,54	25,99	35,53	9,93	0,998
CV75_1	0,00	>50,00	>50,00	>50,00	>25,00	
CV75_2	0,00	>50,00	>50,00	>50,00	>25,00	
CV75_3	0,00	>50,00	>50,00	>50,00	>25,00	
CV40C_1	0,00	10,57	16,29	19,42	5,66	0,998
CV40C_2	0,00	11,99	16,62	19,98	5,79	0,999
CV40C_3	0,00	10,53	16,64	19,79	5,78	0,997
CV75C_1	0,00	28,40	>50,00	>50,00	>17,04	0,988
CV75C_2	0,00	30,99	>50,00	>50,00	>17,27	0,995
CV75C_3	0,00	45,49	>50,00	>50,00	>18,61	0,997

Através da tabela 8, pode-se observar a variação do Coeficiente de Carbonatação para cada camada estudada, bem como o hidróxido de cálcio, o teor de água combinada e o percentual de poros com diâmetro menor que 10 nm.

Tabela 8 – Relação entre o coeficiente de carbonatação, hidróxido de cálcio, água combinada e diâmetro dos poros para as três profundidades.

TRAÇOS	Kc	CH (%)	H <sub>2</sub> Ocomb (%)	D < 10nm (%)
R40_1	4,68	8,20	3,97	16,00
R40_2	4,50	5,50	3,20	16,30
R40_3	4,10	2,90	2,85	17,40
R75_1	>15,01	1,90	3,01	4,30
R75_2	>15,29	2,70	3,33	6,80
R75_3	>15,22	3,70	3,42	9,80
CV40_1	9,01	3,60	3,50	20,00
CV40_2	9,48	1,10	3,17	23,30
CV40_3	9,93	0,80	3,09	30,00
CV75_1	>25,00	2,00	2,70	5,10
CV75_2	>25,00	2,80	2,87	10,20
CV75_3	>25,00	3,20	3,16	19,10
CV40C_1	5,66	8,30	6,15	19,80
CV40C_2	5,79	8,60	6,26	22,80
CV40C_3	5,78	8,70	6,90	28,00
CV75C_1	>17,04	3,00	2,11	8,20
CV75C_2	>17,27	4,60	4,60	13,00
CV75C_3	>18,61	6,50	4,87	19,70

### 5.3.1 - COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO POR CAMADAS

Um dos objetivos do presente trabalho é verificar as diferenças que podem ocorrer entre as três profundidades estudadas. Na camada 1 estudou-se os fenômenos ocorridos da superfície do concreto até 1,0 cm, já a camada 2 vai de 2,5 a 3,5 cm, e a camada 3 os estudos ocorrem 4,5 a 5,5 cm.

Observa-se, através da figura 43, que tanto no concreto de referência R40, como no R75, ocorrem pequenas variações no coeficiente de carbonatação da camada 1 (4,68 mm/sem<sup>0,5</sup>) para camada 3 (4,10 mm/sem<sup>0,5</sup>), porém ocorre um coeficiente de carbonatação aproximadamente 3 vezes maior para o traço R75 em relação ao R40, tendo em vista que o primeiro concreto é mais poroso.

Observa-se, através da figura 44, que o concreto com cinza volante CV40 apresenta uma variação no coeficiente de carbonatação em torno de 10% da camada 1 (9,01 mm/sem<sup>0,5</sup>) para camada 3 (9,93 mm/sem<sup>0,5</sup>). Para o traço CV75 os valores são superiores a 25 mm/sem<sup>0,5</sup>, com acréscimo de mais de 2,5 vezes em relação aos traços CV40. Isso porque ocorreu a carbonatação total do corpo-de-prova do primeiro.

Já nos traços com cal hidratada, pode ser observado, através da figura 45, que o concreto com cinza volante e cal CV40C apresenta uma variação no coeficiente de carbonatação em torno de 2% da camada 1 (5,66 mm/sem<sup>0,5</sup>) para camada 3 (5,79 mm/sem<sup>0,5</sup>), para o traço CV75C os valores são superiores a 17 mm/sem<sup>0,5</sup>, com acréscimo de mais de 3 vezes em relação aos traços CV40C, isso porque ocorreu a carbonatação total do corpo-de-prova do primeiro.

Observa-se nas figuras 43, 44 e 45 que as variações entre as camadas 1 e 3 não foram muito grandes. A maior diferença ocorreu para o traço R40 (-12,4%), com tendência de decréscimo da superfície para o interior. Para os demais traços as variações foram inferiores a 10%, sendo que apenas os traços CV40 e CV75C apresentaram tendências de aumento da carbonatação a camada 1 para a 3.

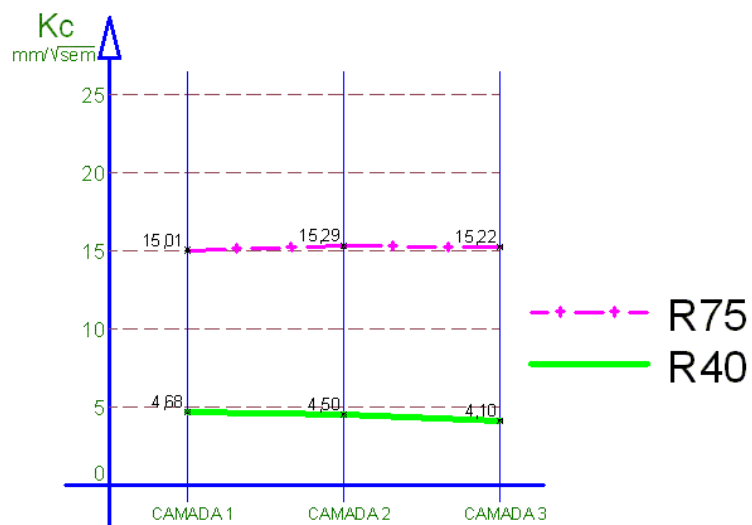


Figura 43 – Coeficiente de carbonatação x Camadas – Traços de referência

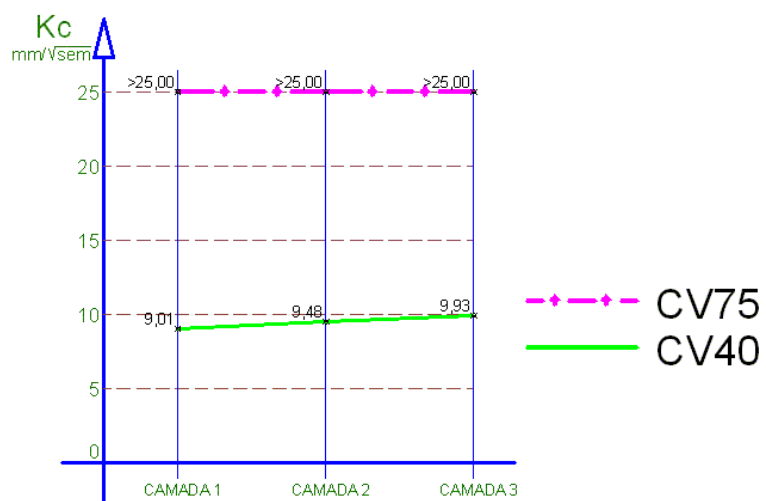


Figura 44 – Coeficiente de carbonatação x Camadas – Traços com cinza volante

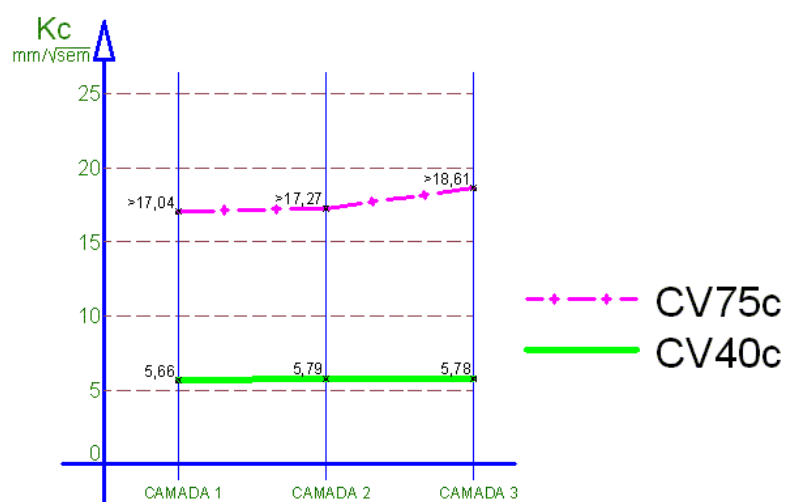


Figura 45 – Coeficiente de carbonatação x Camada – Traços com cinza volante e cal



## **5.4 COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO X HIDRÓXIDO DE CÁLCIO REMANESCENTE**

O teor de hidróxido de cálcio remanescente para as diversas misturas serão mostrados a seguir, em conformidade com a tabela 8.

### **5.4.1 TRAÇOS R40xR75**

Relacionando os traços de referência R40 e R75, figura 46, pode-se observar que o traço R75 apresenta valores para o coeficiente de carbonatação superiores a 200% que o traço R40, porém o teor de hidróxido de cálcio remanescente do traço R40 apresenta valores, em média, 3 vezes maiores.

Esta diferença se explica tendo em vista que no traço R75 o concreto possui 238 kg/m<sup>3</sup>, enquanto que no R40 427 kg/m<sup>3</sup>, ou seja, uma diferença de 79% do primeiro para o segundo, logo menor teor de produtos hidratados e de CH.

No R40 detecta-se aparente incongruência nos resultados porque a camada 1 apresenta o maior teor de CH = 8,20% e a camada 3 CH = 2,90%, enquanto que o coeficiente de carbonatação também decresce da camada 1 para a 3 (-14%). Esta queda não é muito acentuada mas o teor de CH na camada 3 é 2,8 vezes menor do que na 1. Provavelmente este comportamento seja devido ao teor dos poros maiores que 50 nm que, na camada 1 é de 72,6% com queda para 54,5% na camada 3. O efeito parede na camada 1 proporcionaria aumento nos macroporos e, ao mesmo tempo, devido à ação de água da chuva devido à cura ambiental, proporcionaria maior formação de C-S-H e de CH, em relação à camada 3. Nesta última, observou-se leve acréscimo (2%) no coeficiente de carbonatação da camada 1 para 3, embora o teor de CH tenha quase dobrado, de 1,9% para 3,7%. Considerando que a camada 1 do traço R75 apresentou teor de 74,8% de macroporos, maior do que o R40, talvez houvesse maior lixiviação do CH devido a maior porosidade desta camada em relação ao concreto mais denso, o que explicaria o teor de quase a metade de CH em relação à camada 3.

### **5.4.2 TRAÇOS CV40xCV75**

Na figura 47, relacionando os traços com 50% de cimento Portland e 50% de cinza volante, denominados CV40 e CV75, pode-se observar que o traço CV75 apresenta valores para o coeficiente de carbonatação, em média, 2,50 vezes superiores ao traço CV40, já o teor de hidróxido de cálcio remanescente no traço CV40 decresce da camada 1 para camada 2 e para camada 3, já no traço CV75 não foi detectada tendência de variação.

No traço CV40, o teor de CH decresce camada 1 para 3 de 3,60% para 0,80%, diminuição de 4,5 vezes, enquanto a carbonatação cresceu 10%, o que neste caso é um comportamento mais coerente, ou seja, maiores carbonatações se traduzem em menores teores de CH. Comparados com o traço R40, na camada 1 o teor de CH caiu de 8,20% para 3,60% e, na camada 3, de 2,92% para 0,80%, o que pode ser explicado pelas reações pozolânicas. De fato, o teor de poros menores de 10 nm somaram 20% na camada 1 e 30% na camada 3, evidenciando maior refinamento nesta última, o que sugere maior teor de reações pozolânicas e, logo, menor teor de CH.

### **5.4.3 TRAÇOS CV40CxCV75C**

Na figura 48, no cruzamento dos traços com 50% de cimento Portland, 50% de cinza volante e adição de 20% de cal hidratada, pode-se observar que o traço CV75C apresenta valores para o coeficiente de carbonatação em média 3 vezes superiores ao traço CV40C, já o teor de hidróxido de cálcio remanescente no traço CV40C os valores superam os do traço CV75C.

No traço CV40C observa-se pequena variação do teor de CH entre camadas 1 e 3 (5%), com praticamente ausência de alterações na carbonatação. Provavelmente a maior compacidade dada pela presença de CH adicional seja o responsável pela maior homogeneidade do teor entre as camadas. Para o traço CV75C detecta-se aumento do teor de CH da camada 1 para 3 (3,0 para 6,5%), com acréscimo no coeficiente de carbonatação de 9%. O valor menor de CH na superfície poderia ser explicado pelo efeito de lixiviação pela água da chuva e pela maior porosidade devida ao efeito parede.

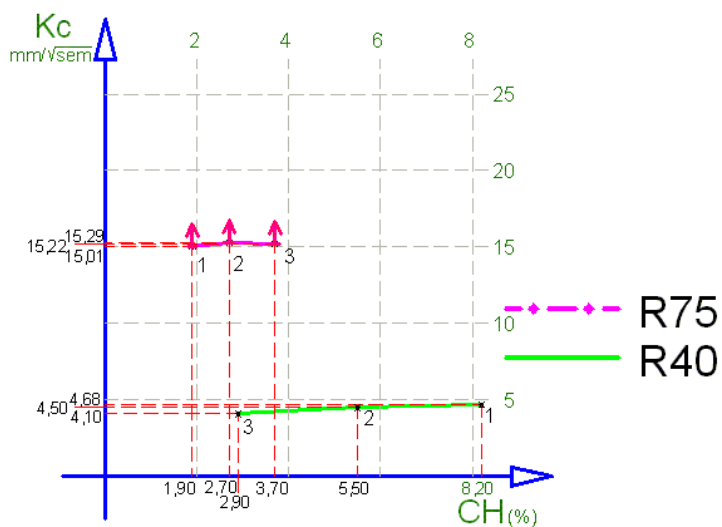


Figura 46 - Comparação R40xR75 - Hidróxido de Cálcio

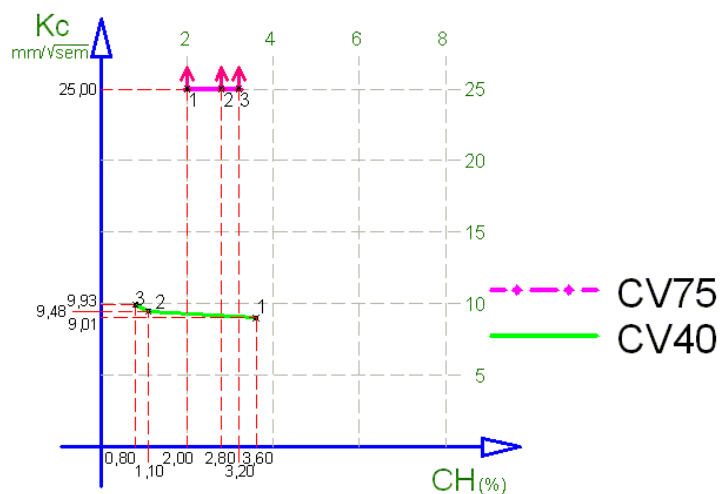


Figura 47 - Comparação CV40xCV75 - Hidróxido de Cálcio

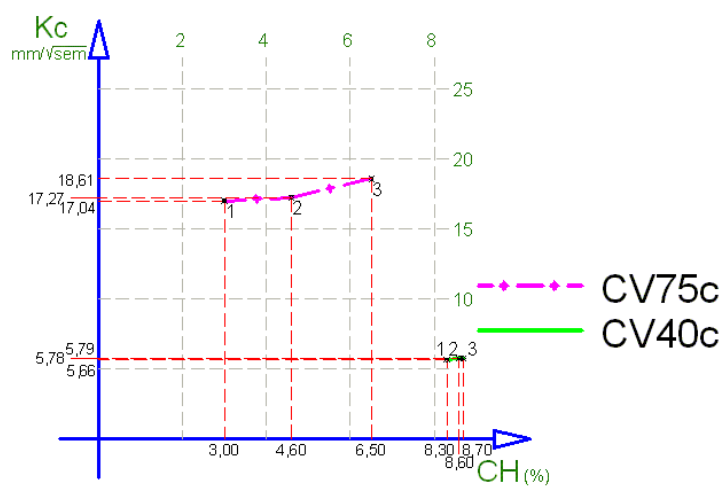


Figura 48 - Comparação CV40xCV75c - Hidróxido de Cálcio

#### **5.4.4 TRAÇOS CV40xCV40C**

Na figura 49 pode-se observar que o traço CV40 apresenta valores para o coeficiente de carbonatação 1,6 vezes superiores ao traço CV40C, já o teor de hidróxido de cálcio remanescente no traço CV40C os valores superaram os do traço CV40, o que se justifica pela adição da cal hidratada que repõe a reserva alcalina.

Na camada 1 o teor de CH aumentou de 3,60%, no traço CV40, para 8,30% no CV40C, um acréscimo de mais de 2,3 vezes, enquanto que na camada 3 o aumento foi de 0,80% para 8,70%, 10,8 vezes. Observa-se que a camada 1 do traço sem cal sofreu a influência da maior porosidade e do efeito parede do que o traço com cal, o qual apresenta retenção de água e maior possibilidade de cura interna, quando o concreto é mais denso, como no presente caso.

#### **5.4.5 TRAÇOS CV75xCV75C**

Na figura 50 observa-se que o traço CV75 apresenta valores para o coeficiente de carbonatação, em média, 42% superiores aos do traço CV75C.

A comparação das camadas 1 destes traços revela acréscimo de 2,00% para 3,00%, 1,5 vezes, enquanto que as camadas 3 apresentaram valores de 3,20% e 6,50%, 1,9 vezes. Em termos proporcionais esta variação é bastante próxima, embora o traço CV75C tenha maior acréscimo no teor de CH da camada 1 para 3, devido ao fator de retenção de água pela cal, como acima mencionado.

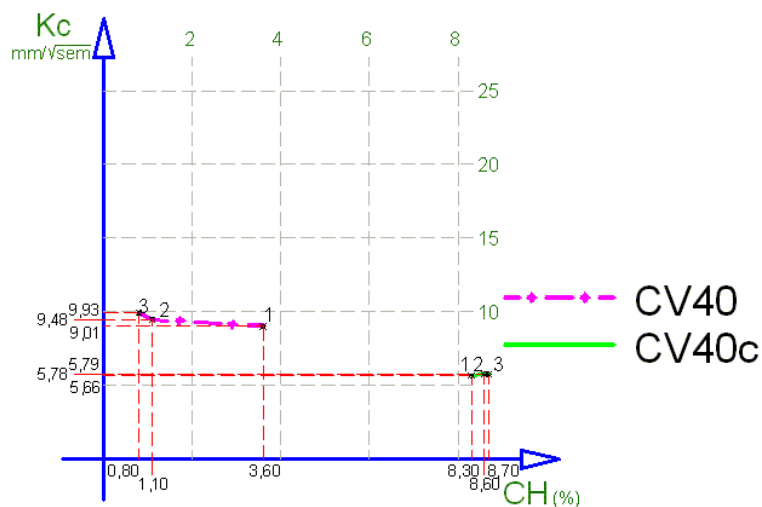


Figura 49 - Comparação CV40xCV40C - Hidróxido de Cálcio

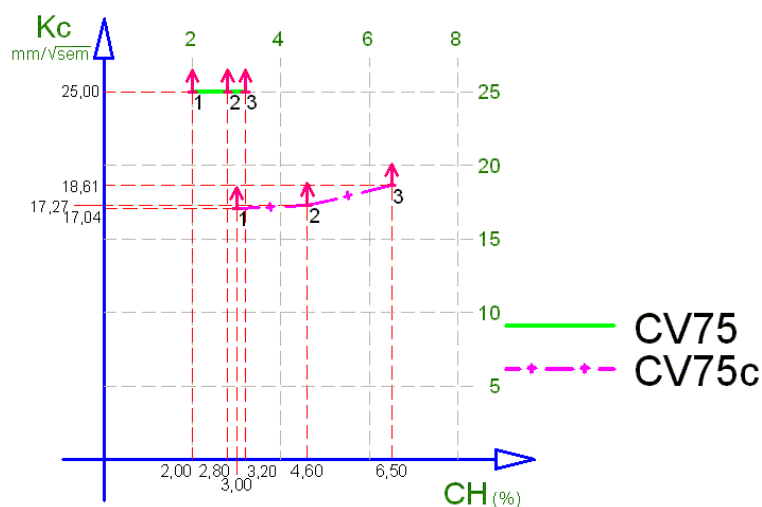


Figura 50 - Comparação CV75xCV75C - Hidróxido de Cálcio

Observa-se que a adição de cal hidratada, nas misturas de concreto de cimento Portland e cinza volante, reduziu de maneira geral as profundidades carbonatadas e os coeficientes de carbonatação das misturas com cal em relação às misturas sem cal.

## **5.5 COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO X ÁGUA COMBINADA**

A variação do teor de água quimicamente combinada com a carbonatação das diversas misturas é mostrado a seguir.

### **5.5.1 TRAÇOS R40xR75**

Relacionando os traços de referência R40 e R75, figura 51, pode-se observar que o traço R75 apresenta valores para o coeficiente de carbonatação superiores a 200% em relação ao traço R40, porém no teor de água combinada no traço R40 ocorre um decréscimo da camada 1 (3,97%) para camada 3 (2,85%) já no traço R75 ocorre um incremento da camada 1 para 3 de 3,01% para 3,42%

Para o R40 o coeficiente de carbonatação decresceu da camada 1 para a 3 de 14% enquanto que a água combinada de 39%. Para o R75 a carbonatação permaneceu quase constante enquanto que a água combinada decresceu de 14% da 1 para 3 camada. Estas tendências são as mesmas apresentadas com o hidróxido de cálcio, pela comparação entre as figs. 46 e 51.

### **5.5.2 TRAÇOS CV40xCV75**

Pode-se observar, através da figura 52, que o teor de água combinada no traço CV40 decresce da camada 1 para camada 2 e para camada 3, já no traço CV75 ocorre o contrario. Nota-se ainda que no traço com cinza volante, o teor de água combinada na camada 1 é de apenas 0,47% menor do que o teor observado na mesma camada do traço de referência.

Para o CV40 houve aumento da carbonatação com aumento da água combinada da camada 1 para a 3, ambos da ordem de 10%, provavelmente devido a menor quantidade de CH na superfície, coerentemente com o que apresenta a figura 47. O traço CV75, devido à carbonatação total do corpo-de-prova, não é possível estabelecer relações, embora a variação da água

combinada entre as camadas 1 e 3 tenha crescido 14%, da mesma forma que o CH.

### **5.5.3 TRAÇOS CV40CxCV75C**

Na figura 53 pode-se observar que o traço CV75C apresenta valores para o coeficiente de carbonatação superiores ao traço CV40C, já o teor de água combinada no traço CV40C os valores superam os do traço CV75C.

Ao se comparar os traços R40, CV40 e CV40C, pode-se observar que o traço com cinza volante e cal, ao contrário dos dois anteriores, foi o único da relação  $a/mc = 0,40$  que mostrou um crescimento do teor de água combinada com o aumento da profundidade, de 6,15% na camada 1, para 6,26% na camada 2 (aumento de 0,1%) e 6,90% na camada 3 (aumento de mais 0,64% em relação à camada anterior). Estes teores são, respectivamente, 1,5, 1,9 e 2,4 vezes maiores que os teores observados nas camadas 1, 2 e 3 do traço de referência e 1,8, 2,0 e 2,2 vezes maiores que os teores de CV40 nas mesmas camadas. Este comportamento demonstra o efeito benéfico da adição de cal que diminuiu a carbonatação e aumentou o teor de água combinada devido ao efeito de nucleação.

No traço CV75C, entre as camadas 1 e 3, a carbonatação aumentou 9%, enquanto que a água combinada 131%, o que mostra a vantagem da cal para os traços com maior porosidade, em termo de aumento da quantidade de formação de C-S-H.

Em comparação com o traço CV40C, o traço CV75C apresentou valores 2,9, 1,3 e 1,4 vezes menores nas camadas 1, 2 e 3, respectivamente, ocasionados pelo menor teor de cimento e maior dimensão dos poros (maior diâmetro crítico).

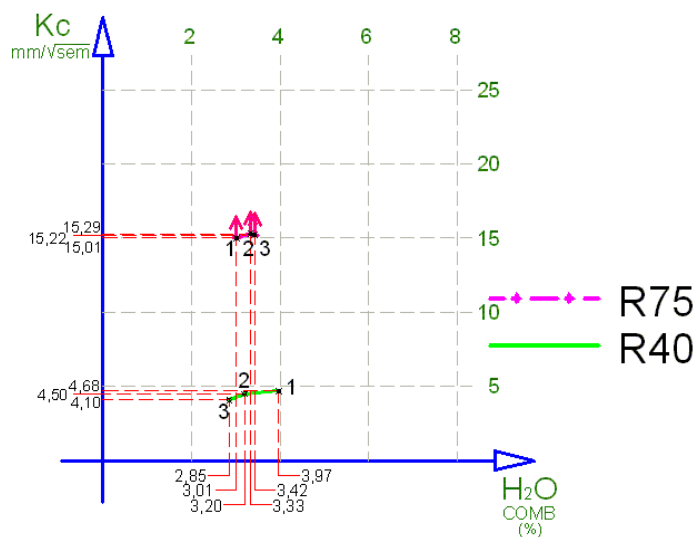


Figura 51 – Comparação R40xR75 – Água combinada

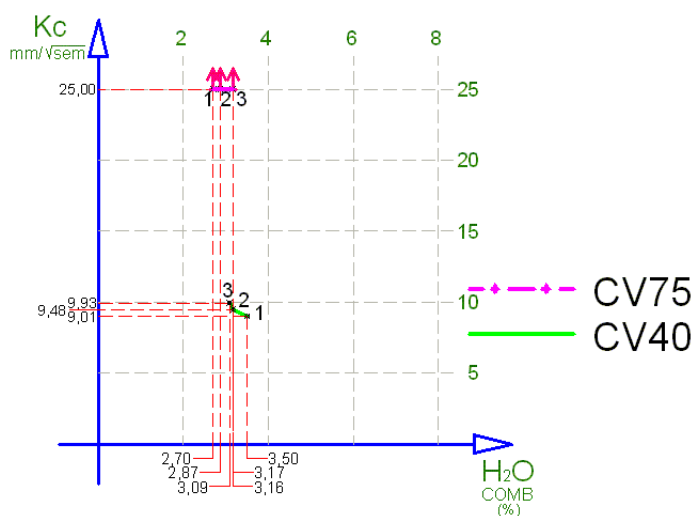


Figura 52 - Comparação CV40XCV75 – Água Combinada

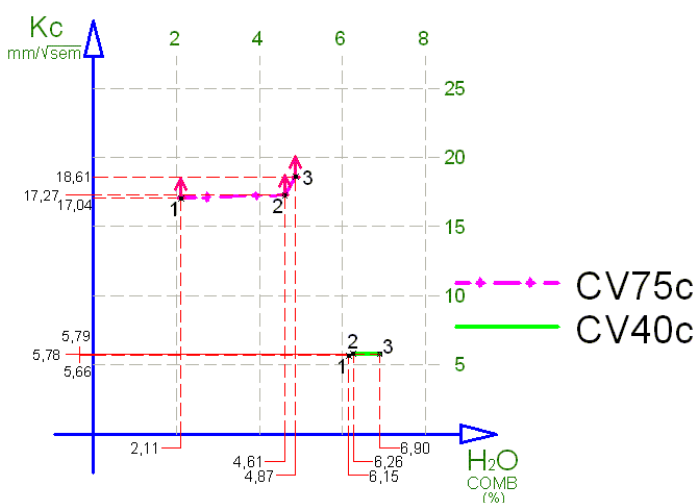


Figura 53 - Comparação CV40CXCV75C – Água Combinada



#### **5.5.4 TRAÇOS CV40xCV40C**

Na figura 54 pode-se observar que o traço CV40 apresenta valores para o coeficiente de carbonatação superiores ao traço CV40C, já o teor de água combinada no traço CV40C os valores superam os do traço CV40, o que se justifica pela adição da cal hidratada que repõem a reserva alcalina.

#### **5.5.5 TRAÇOS CV75xCV75C**

A figura 55 mostra que o traço CV75 apresenta valores para o coeficiente de carbonatação 45% superiores ao traço CV75C, já o teor água combinada no traço CV75C os valores superam os do traço CV75, nas camadas 2 e 3. Para o traço CV75 observaram-se aumentos de 0,17% da primeira para a segunda camada e de 0,29% da segunda para a terceira camada. Já para o traço CV75C, com cinza volante e cal, o teor de água combinada observado na camada 1 foi o menor de todos os traços (2,11%), aliada ao maior tamanho das moléculas de CH remanescente nesta zona de interface, a perda de água durante a cura é mais acentuada, com maior sensibilidade do que o traço sem cal. Porém, a partir da camada 2, este comportamento se inverte mostrando que os primeiros 20 mm da superfície se comportam como protetores do concreto mais interior. Da camada 1 para a camada 2, CV75C apresentou um aumento de 2,49% no teor de água combinada, e da camada 2 para a camada 3, o aumento foi de 0,27%, enquanto que o coeficiente de carbonatação aumentou de 17,04 mm/sem<sup>0,5</sup> para 18,60 mm/sem<sup>0,5</sup> (9%).

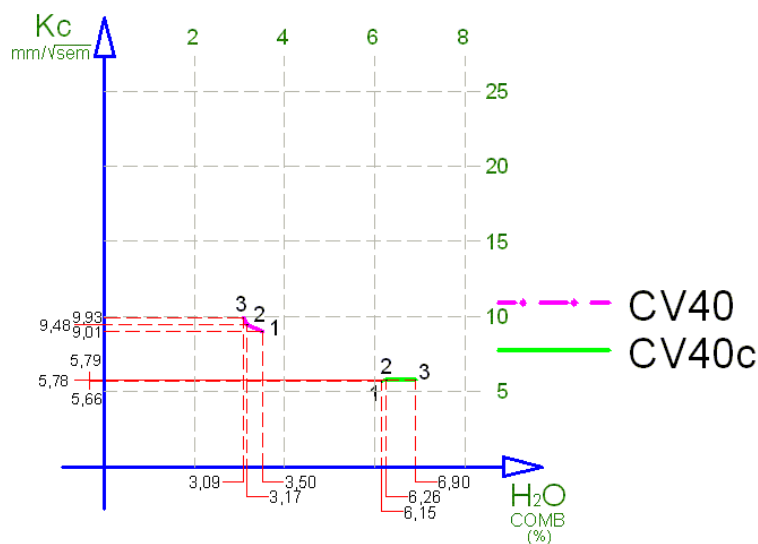


Figura 54 - Comparação CV40XC40C – Água Combinada

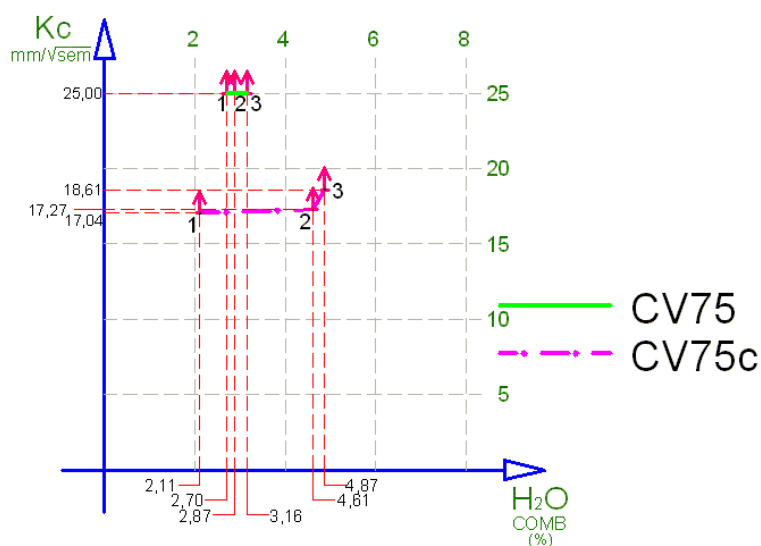


Figura 55 - Comparação CV75XC75C – Água Combinada

## 5.6 COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO $X \varnothing < 10 \text{ nm}$

Através dos resultados obtidos pode-se observar que para todos os traços o percentual de poros com diâmetros maiores que 50 nm diminuíram à medida que a profundidade aumentou, fato que indica uma maior porosidade na superfície do concreto, revelando assim a existência do “efeito parede”, causado pelo acúmulo de água na interface forma/concreto.

Já nos traços com adição de cinza volante, comprova-se a diminuição do tamanho dos poros, pois todos os traços desta adição, apresentam me-

nor porcentagem de poros grandes ( $\varnothing > 50$  nm) nas três profundidades estudadas.

Já nos traços com cinza volante e cal, também houve um significativo refinamento da dimensão dos poros, bem acima do observado no traço de referência, porém não tão acentuado quanto no traço sem cal.

Com isso conclui-se que a cal hidratada, além de repor a reserva alcalina nas misturas de concreto, também proporciona uma diminuição da permeabilidade e dos poros abertos da pasta.

### **5.6.1 TRAÇOS R40xR75**

Relacionando os traços de referência R40 e R75, figura 56, pode-se observar que o traço R75 apresenta valores para o coeficiente de carbonatação 240% superiores ao traço R40, porém o percentual de poros com diâmetro menor que 10 nm o traço R40 apresenta valores 2,2 vezes maiores que o traço R75. Nota-se que no traço R40 ocorre um aumento no percentual de diâmetro de poros com  $\varnothing < 10$  nm da camada 1 para camada 3 de 9% e para o coeficiente de carbonatação 14%, variações não muito discrepantes. No traço R75 a variação da 1 para 3 camada foi de 128% para os poros inferiores a 10 nm, enquanto que para a carbonatação não pode ser realizada avaliação devido à neutralização total do corpo-de-prova.

### **5.6.2 TRAÇOS CV40xCV75**

Para os traços CV40 e CV75, figura 57, pode-se observar que o traço CV75 apresenta valores para o coeficiente de carbonatação 2,6 vezes superiores ao traço CV40, já o percentual de poros com diâmetro menor que 10 nm no traço CV40 os valores são em média 2,5 vezes maiores, isto é, variação da mesma ordem de grandeza.

Pela inclinação das retas constata-se que o traço de referência teve menores acréscimos do que os com cinza volante, principalmente a partir da camada 2, ou seja, o concreto com somente cimento Portland, principalmente em baixas relações a/mc, sofre menor influência do efeito parede na interface com a fôrma.

De uma maneira geral, os traços com cinza volante apresentam uma maior porcentagem de poros nesta faixa de diâmetros menores que 10 nm. Na camada 3, essa tendência se acentua, pois verifica-se que todos os traços com cinza volante têm uma maior quantidade de poros de diâmetro menor que 10 nm nesta profundidade. Isso confirma o pressuposto de que a adição pozolânica refina os poros do concreto, desde que haja maior teor de umidade. Sabe-se que o refinamento ocorre em qualquer ponto do concreto, somente que na superfície, devido a maior porosidade e maior distanciamento entre partículas, devido às trocas de umidade com o meio ambiente, este fenômeno é menor, sendo tanto maior quanto mais confinado estiverem os compostos da pasta cimentícia.

Os efeitos das variações nos poros menores de 10 nm não se refletem na carbonatação, visto que as variações entre as camadas 1 e 3 são menores de 10%, mostrando que o refinamento dos poros devido a adição de cinza volante ao traço, diminuindo a difusão do  $\text{CO}_2$ , não sobrepujam o efeito da diminuição do teor de hidróxido de cálcio.

Nos traços com cinza volante sem cal, percebe-se que há uma tendência maior de refinamento dos poros à medida que aumenta a profundidade de estudo, sendo que a quantidade de poros com diâmetro nesta faixa na camada 3 é mais pronunciada.

### **5.6.3 TRAÇOS CV40CxCV75C**

Através da figura 58 pode-se observar que o traço CV75C apresenta valores para o coeficiente de carbonatação, em média, 2,8 vezes superiores ao traço CV40C. Já o percentual de poros com diâmetro menor que 10 nm no traço CV40C os valores superam os do traço CV75C ao redor de 1,7 vezes.

No traço CV40C observa-se uma variação no coeficiente de carbonatação da camada 1 para camada 2 em 3%, e da camada 2 para camada 3 de 5,2%. Já no traço CV75C a variação da camada 1 para camada 2 é de 4,8% e da camada 2 para camada 3 a variação foi de 6,70%. O menor teor de poros com diâmetro menor que 10 nm para os traços com cinza volante e cal

em relação aos sem cal, é devido ao maior teor de CH remanescente, que possuem moléculas de grande dimensão em relação ao C-S-H (silicato de cálcio hidratado).

O comportamento da carbonatação dos traços com cal, em relação à variação do teor de poros menores de 10 nm, é semelhante ao dos traços sem cal, como mostram as figuras 57 e 58.

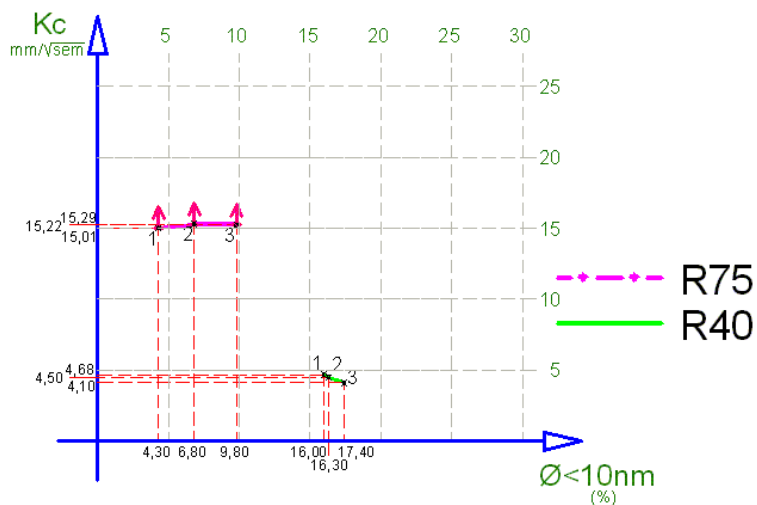


Figura 56 - Comparação R40xR75 – Diâmetro dos poros

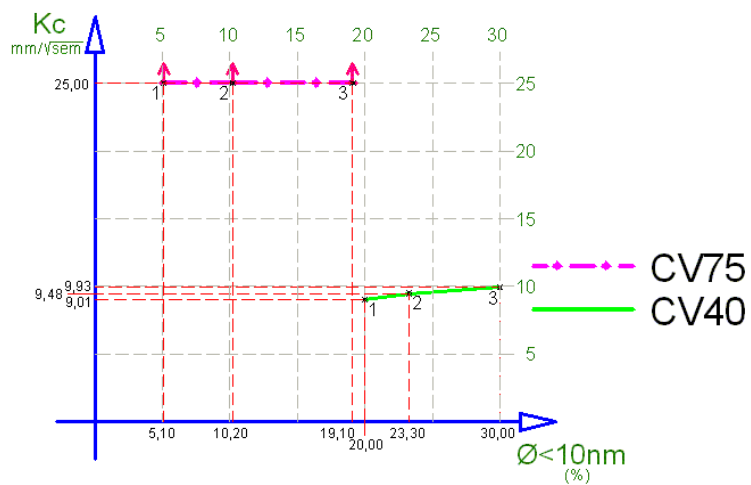


Figura 57 - Comparação CV40XCV75 – Diâmetro dos poros

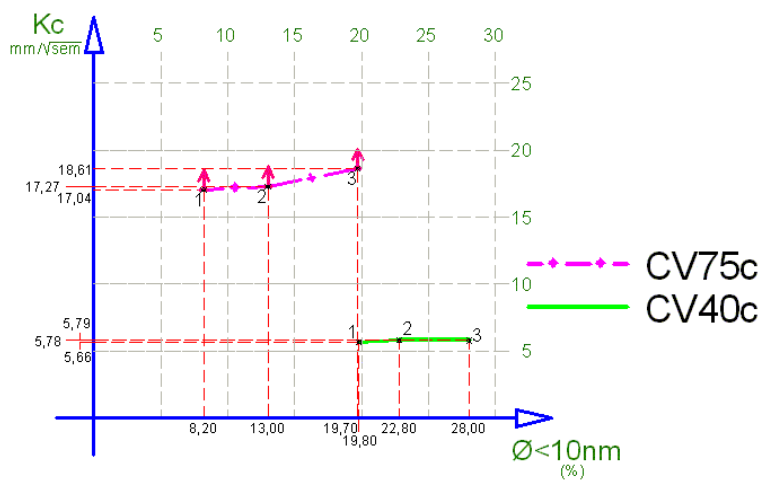


Figura 58 - Comparação CV40CXCV75C – Diâmetro dos poros

#### **5.6.4 TRAÇOS CV40xCV40C**

Relacionando-se o traço CV40 com o traço CV40C, conforme figura 59, pode-se observar que o traço CV40 apresenta valores para o coeficiente de carbonatação, em média 64% superiores ao traço CV40C, já o percentual de poros com diâmetro menor que 10 nm, para o traço CV40, os valores superam os do traço CV40C nas 3 camadas. Porém a diferença entre os valores da camada 1 do traço CV40 para o traço CV40C é de 0,2%, para camada 2 é de 0,5% e para a camada 3 é de 2,0%.

A amplitude da variação dos diâmetros inferiores a 10 nm entre camadas 1 e 3 são similares entre os dois traços, enquanto que a carbonatação apresenta pouca oscilação, a não ser na camada 1 do traço sem cal, que apresentou valor ligeiramente inferior para o coeficiente de carbonatação.

#### **5.6.5 TRAÇOS CV75xCV75C**

Através da figura 60, pode-se observar que o traço CV75 apresenta valores para o coeficiente de carbonatação 1,50 vezes superiores ao traço CV75C, já o percentual de poros com diâmetro menor que 10 nm no traço CV75C os valores superam os do traço CV75, nas camadas 1, 2 e 3.

Para o traço CV75 a variação no percentual de poros com diâmetro menor que 10 nm, da camada 1 para camada 2 é de 5,10% e da camada 2 para camada 3 a variação é de 8,90%. Já para o traço CV75C, a variação da camada 1 para camada 2 é de 4,80% e da camada 2 para camada 3 a variação é de 6,70%. Nota-se que a adição de cal, gera moléculas de grandes dimensões ao traço com cinza volante, o que faz com que o traço sem cal apresente um menor teor de poros com diâmetro menor que 10 nm. O traço CV75 sem cal para os poros menores de 10 nm, na camada 1, teor menor do que para a mistura com cal, mostrando que a cal traz maior refinamento para a superfície do que para a camada 3, enquanto que as oscilações da carbonatação são menos relevantes.

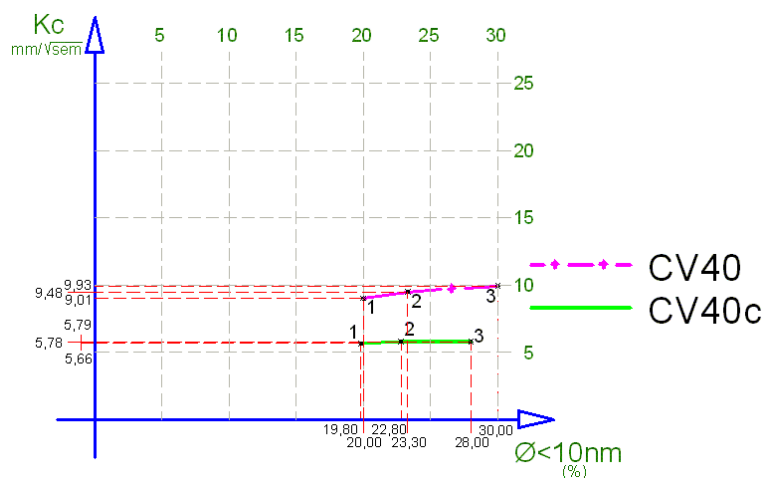


Figura 59 - Comparação CV40XCV40C – Diâmetro dos Poros

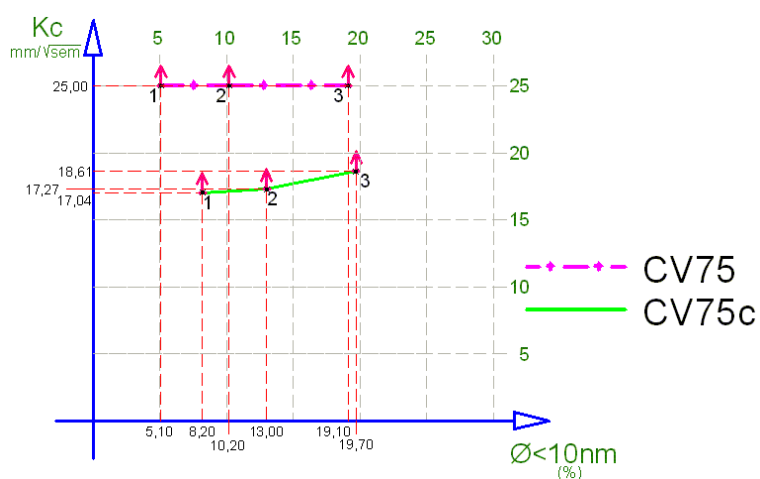


Figura 60 - Comparação CV75XCV75C – Diâmetro dos Poros

## 5.7 ANALISE POR TRAÇOS

Analisando os traços individualmente pode-se comparar o coeficiente de carbonatação, o teor de hidróxido de cálcio remanescente, o teor de água combinada e o percentual de poros com  $\varnothing < 10\text{ nm}$ . (tabela 8)

### 5.7.1 TRAÇOS R40xCV40

Ao compararmos os traços R40 (cimento Portland) e CV40 (50% de cimento e 50% cinza volante), figura 61, observamos que o coeficiente de carbonatação e o percentual de poros com diâmetro menor que 10 nm são



maiores para o traço com cinza volante, já o hidróxido de cálcio remanescente e o teor de água combinada, são maiores para o traço de referência.

Este comportamento já era esperado porque o uso de cinza volante no concreto reduz o teor de hidróxido de cálcio devido às reações pozolânicas, cujo efeito se traduz no refinamento dos poros maiores.

Comparando-se os resultados entre camadas 1 e 3, há tendência de leve diminuição do coeficiente de carbonatação, no traço CV40, em relação ao R40, devido ao maior aumento dos diâmetros dos poros menores de 10 nm. Observa-se que para o traço R40, estes últimos possuem percentuais praticamente constantes, não variando com a profundidade, enquanto que a adição de cinza volante provocou relevante aumento no teor deste tamanho de poros.

O teor de CH apresentou maior amplitude entre camadas 1 e 3 para o traço R40, enquanto que para o CV40 a maior variação ocorreu entre camadas 1 e 2, indicando que a camada superficial consome menos CH, ou seja, possui menor teor de C-S-H secundário devido a maior porosidade e sensibilidade à cura ambiental. Para o traço R40 a água combinada apresentou variação de teores de mais de 1% entre camadas 1 e 3, enquanto que para o CV40 as oscilações foram menores, da ordem da metade da anterior, evidenciando que o refinamento dos poros se dá não só por efeito químico, mas também pelo efeito físico. Isto pode ser evidenciado pela comparação entre o teor de CH e de poros menores de 10 nm, tendo em vista que este último apresenta acréscimos da ordem de 50% entre a superfície e camada 3, enquanto que a água combinada é cerca de 25%.

Estes efeitos não influíram muito sobre o coeficiente de carbonatação desde que houve aumento de cerca de 100% desta com a adição de cinza volante em relação ao traço de referência, mostrando que o efeito da queda da reserva alcalina é muito mais importante do que o refinamento dos poros.

### **5.7.2 TRAÇOS R75xCV75**

Observa-se, na figura 62, que o coeficiente de carbonatação e o percentual de poros com diâmetro menor que 10 nm são maiores para o traço

com cinza volante, já o hidróxido de cálcio remanescente e o teor de água combinada são maiores para o traço com cinza volante.

Comparando-se com a figura 61 evidencia-se que o aumento da relação  $a/ag$  de 0,40 para 0,75 trouxe aumentos maiores para o traço com cinza volante (cerca de 2,5 vezes) do que para o referênci (cerca de 2 vezes). O aumento da porosidade diminuiu a amplitude das variações entre os teores de CH e água combinada, nota-se que a maior disponibilidade de espaço aumentou o teor de CH na camada 3 do traço CV75 em relação ao CV40. O teor de poros menores de 10 nm teve maior queda na camada 1 (cerca de 3 vezes) do que na camada 3 (cerca de 1,5 vezes), mostrando que o aumento da porosidade total é mais expressiva na superfície, pelo efeito parede, do que a 5 cm de profundidade.

Apesar do teor de CH e água combinada do traço CV75 ter se mantido na mesma faixa de variação do traço CV40, seus efeitos sobre a carbonatação não foram muito sensíveis, desde que houve aumento do patamar de 10 mm/sem<sup>0,5</sup> deste último para >25 mm/sem<sup>0,5</sup> do primeiro, sugerindo que o aumento da porosidade (relação  $a/ag$ ), efeito físico, prepondera sobre a menor taxa das reações pozolânicas e de hidratação, efeito químico. Infelizmente este efeito não pode ser dimensionado entre as camadas o traço CV75 em virtude da carbonatação total do corpo-de-prova.

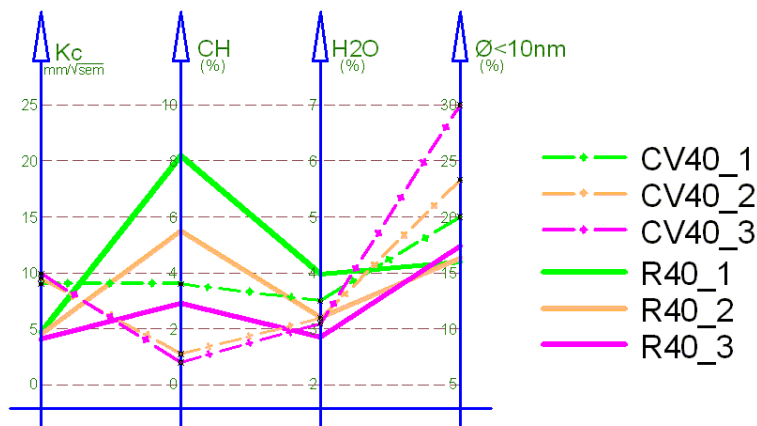


Figura 61 – Cruzamento dos Traços R0xCV40

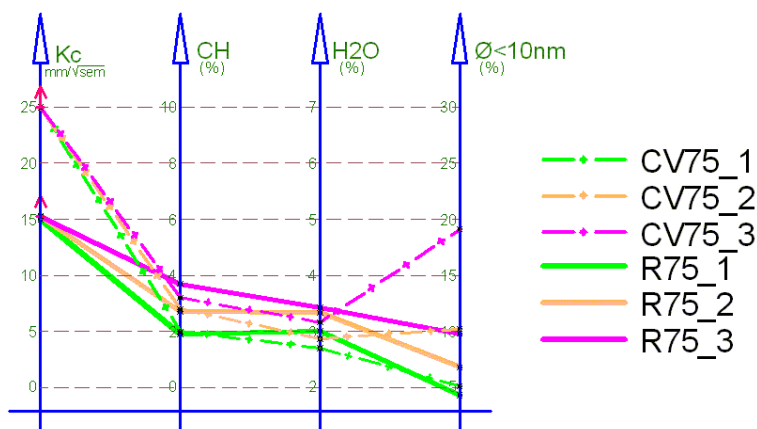


Figura 62 – Cruzamento dos Traços R75xCV75

### 5.7.3 TRAÇOS R40xCV40C

Na figura 63, observamos que o coeficiente de carbonatação, o teor de hidróxido de cálcio remanescente, o teor de água combinada e o percentual de poros com diâmetro menor que 10 nm são maiores para o traço com cinza volante e cal.

Comparando-se com a figura 61, observa-se que a adição de cal diminuiu o coeficiente de carbonatação quase pela metade, praticamente coincidindo com os do traço e referência. Os teores de CH aumentaram da ordem de 3 vezes e o de água combinada cerca e 2 vezes, enquanto que o teor de

poros menores de 10 nm mantiveram praticamente os mesmos teores dos traços sem cal. Este comportamento reitera que a carbonatação dos traços com baixa relação a/ag depende mais do teor de CH nos poros intersticiais (ação química) do que do efeito físico do refinamento dos poros (efeito físico).

Observa-se que, entre as camadas 1 e 3, para as quatro variáveis, as amplitudes da variação total são menores para o traço com cal, em relação ao CV40, evidenciando que a ação da cal propicia maior quantidade de compostos hidratados, tornando a microestrutura da pasta cimentícia mais homogênea, diminuindo as diferenças entre a superfície e o interior do concreto.

#### **5.7.4 TRAÇOS R75xCV75C**

Na figura 64 observamos que o coeficiente de carbonatação, o teor de hidróxido de cálcio remanescente, o teor de água combinada e o percentual de poros com diâmetro menor que 10 nm são maiores para o traço com cinza volante e cal.

Comparando os resultados das figuras 64 (CV75C) com a figura 62 (CV75), observa-se que a adição de cal diminuiu a carbonatação de um patamar  $>25 \text{ mm/sem}^{0,5}$  para cerca de  $>17 \text{ mm/sem}^{0,5}$ , bem próxima do traço de referência. Este comportamento se deve ao maior teor de CH, que embora tenha caído quase pela metade em relação ao traço CV40C, disponibilizou teor suficiente para frear o avanço da frente de carbonatação. Comportamento similar ocorreu para a água combinada.

Observa-se que as amplitudes das variações entre camada 1 e 3 aumentaram para os teores de CH, água combinada e poros menores de 10 nm, comparados com os traços CV75 (figura 62) e CV 40C (figura 63). Este fato mostra que a maior homogeneidade que a cal oferece para a microestrutura dos traços com relação a/ag 0,40, entre a superfície e o interior, não se reproduz para os traços com relação 0,75, provavelmente pelo maior afastamento entre as partículas das superfícies dos poros, possibilitando maior interação com a variação dos agentes ambientais, do que nos traços com menor permeabilidade.

Observa-se na figura 64, que a camada 3 foi a que apresentou maior crescimento no teor de CH, água combinada e poros menores de 10 nm, em relação as demais, reproduzindo o mesmo comportamento do traço CV40C (figura 63).

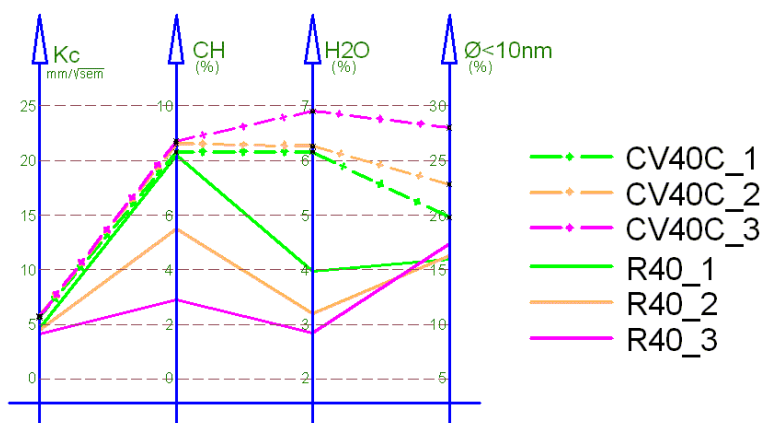


Figura 63 – Cruzamento dos Traços R40xCV40C

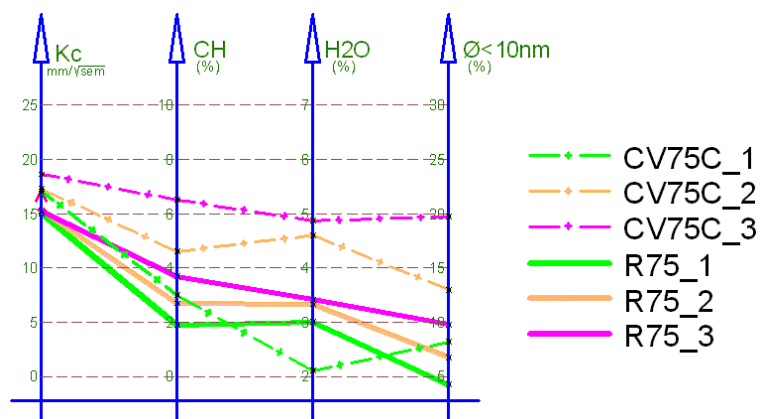


Figura 64 – Cruzamento dos Traços R75xCV75C

### 5.7.5 TRAÇOS CV40xCV40C

Pode-se observar, através da figura 65, que o coeficiente de carbonatação e o percentual de poros com diâmetro menor que 10 nm são maiores para o traço com cinza volante e cal, já o hidróxido de cálcio remanescente e o teor de água combinada, são bem maiores para o traço com adição de cal hidratada.

Esta figura mostra com maior propriedade os efeitos anteriormente descritos sobre a adição da cal hidratada, no que tange o decréscimo da

carbonatação a quase pela metade em relação ao traço sem cal, devido ao aumento do teor de CH, da ordem de 3 vezes e do teor de AC, cerca de 2 vezes. Este comportamento denota que a queda da carbonatação não é proporcional ao aumento do CH porque existe uma interação desta com a estrutura dos poros que é alterada devido ao maior tamanho das moléculas de CH nos interstícios. Observa-se este fato pela leve queda no teor de poros menores de 10 nm. A camada 3 foi a que mais se beneficiou com a adição de cal, invertendo-se seu menor desempenho no traço CV40 em relação ao CV40C, no que tange ao teor e CH e água combinada. Para a carbonatação não há praticamente variação entre as camadas seja nos traços com cal, seja nos sem cal.

#### **5.7.6 TRAÇOS CV75xCV75C**

A figura 66 nos mostra que o coeficiente de carbonatação e o percentual de poros com diâmetro menor que 10 nm são maiores para o traço CV75, já o hidróxido de cálcio remanescente apresentou os maiores valores para o traço com adição de cal hidratada, o teor de água combinada é maior no traço com adição de cal somente na camada 1.

O efeito da adição da cal reduziu o coeficiente de carbonatação de  $>25$  mm/sem<sup>0,5</sup> para  $>17$  mm/sem<sup>0,5</sup>, em média, valor inferior ao dos traços CV40c. O teor de CH residual e de água combinada foram sensivelmente menores do que os do traço CV40C, especialmente para a camada 1 que, nos traços com cal, apresentou valores inferiores de água combinada do que os traços sem cal. Este fato evidencia a maior sensibilidade os traços com porosidade mais elevada na camada superficial, que seriam mais sensíveis à adição de cal do que os traços com relação a/ag menores. A camada 3 foi a que mais se beneficiou com a adição de cal, pois a figura 66 mostra como sendo a que apresentou maior teor de CH, água combinada e poros menores de 10 nm, evidenciando que o menor desempenho da camada 1 devido a cal, se inverte a partir da profundidade de 20 mm (camada 2), tornando o concreto menos poroso no interior da peça em relação à superfície.

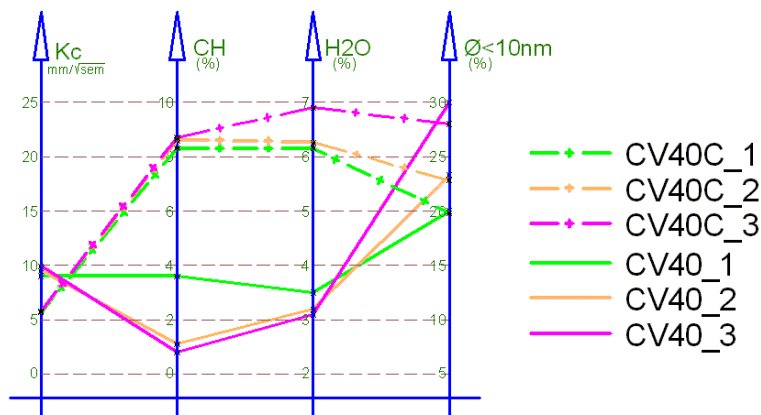


Figura 65 – Cruzamento dos Traços CV40xCV40C

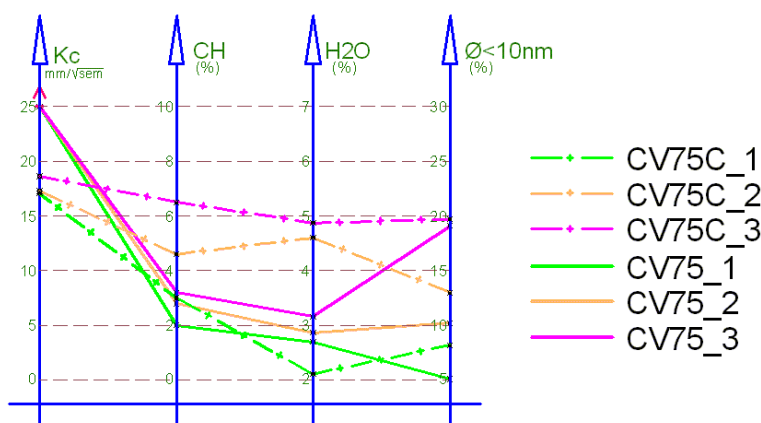


Figura 66 – Cruzamento dos Traços CV75xCV75C

## 5.8 CORRELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO E AS VARIÁVEIS EM ESTUDO

Nas tabelas 8 e 9 verificou-se o grau de correlação entre o coeficiente de carbonatação e hidróxido de cálcio remanescente com as demais variáveis estudadas neste trabalho, para os traços de referência, com cinza volante com e sem cal e a combinação de todos na linha geral, calculou-se a correlação linear, exponencial e logaritima onde escolheu-se o maior valor, foram divididos em quatro grupos onde atribui-se um “X” para correlações inferiores a 0,70, dois para o intervalo entre 0,70 e 0,79, três para o intervalo entre 0,80 e 0,89 e finalmente quatro “x” para correlações entre 0,90 e 1,00. Tendo-se obtido os seguintes resultados:

Tabela 9 – Correlação entre o Coeficiente de Carbonatação e as demais variáveis.

CARBONATAÇÃO - $K_c$ ( $\text{mm}/\sqrt{\text{se}}\text{m}$ )									
Traço	Volume de Hg (ml/g)	Área dos poros ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	Diâmetro crítico (%)	Poros Total (%)	$\varnothing < 10\text{nm}$ (%)	$\varnothing > 50\text{nm}$ (%)	$10 < \varnothing < 50\text{nm}$ (%)	CH (%)	Água Combinada (%)
REF	xx	x	xxxx	xx	xxxx	x	x	x	x
CV	xx	x	xxxx	xxx	xx	xxxx	xxxx	x	x
CVc	xxxx	xx	x	xxxx	xx	xxx	xxx	xxx	xxx
Geral	x	x	x	x	x	x	x	x	x

x < 0,70      xx 0,70 - 0,79      xxx 0,80 - 0,89      xxxx 0,90 - 1,00

Na tabela 9, observa-se que existe uma correlação entre o coeficiente de carbonatação e o traço de referência maior que 0,90 para o diâmetro crítico e para poros com  $\varnothing < 10$  nm, já para o traço com cinza volante as correlações maiores de 0,90 são para o diâmetro crítico, para poros com  $\varnothing > 50$  nm e para poros  $10 < \varnothing < 50$  nm, para percentual total de poros a correlação está entre 0,80 e 0,89.

Observa-se que o coeficiente de carbonatação dos traços se correlacionaram melhor com as variáveis relacionadas com as dimensões dos poros, ou seja, diâmetro crítico, microporos, mesoporos e macroporos. Somente os traços com cal se correlacionaram bem com o teor de CH e água combinada. As melhores correlações encontradas para o coeficiente de carbonatação foram com o diâmetro crítico e porosidade total.



## 5.9 CORRELAÇÃO ENTRE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO REMANESCENTE E AS VARIÁVEIS EM ESTUDO

Tabela 10 – Correlação entre Hidróxido de Cálcio Remanescente e as demais variáveis

HIDROXIDO DE CÁLCIO REMANESCENTE (%)								
Traço	Volume de Hg (ml/g)	Área dos poros (m <sup>2</sup> /g)	Diâmetro crítico (%)	Poros Total (%)	Ø<10nm (%)	Ø>50nm (%)	10<Ø<50nm (%)	Água Combinada (%)
REF	X	XX	X	X	XX	X	XX	XXX
CV	X	XXX	X	X	X	XX	X	X
CVC	XX	XXXX	XXX	X	XXXX	XXXX	X	XXXX
Geral	X	X	X	X	X	X	X	XXX
	X < 0,70	XX 0,70 - 0,79			XXX 0,80 - 0,89		XXXX 0,90 - 1,00	

Analisando-se a tabela 10, observa-se que existe uma correlação entre o percentual de hidróxido de cálcio remanescente e água combinada, para o concreto de referencia entre 0,80 e 0,89, já para o traço com cinza volante a maior correlação ocorre na área dos poros com valores entre 0,80 e 0,89, já no traço com cinza volante e cal as maiores correlações estão na área dos poros, poros com Ø<10 nm, poros com Ø>50 nm e água combinada com correlações superiores a 0,90.

O teor de CH e as demais variáveis de estudo se correlacionou melhor para com os traços CVC com as demais variáveis estudadas. No geral, as melhores correlações encontradas para os teores de hidróxido de cálcio residual foram com a área total dos poros e água combinada, resultado coerente porque o teor de CH é uma consequência das reações pozolânicas e de hidratação, sendo que as primeiras produzem refinamento dos poros, isto é, aumento da área específica dos mesmos. Também houve boa correlação com os poros menores de 10 nm, o que comprova esta assertiva.

## **CONCLUSÃO**

Com base nos objetivos específicos desta pesquisa, abaixo relacionados:

- Determinar a influência da adição de cal hidratada na carbonatação de concretos com altos teores de adições minerais;
- Comparar os resultados dos ensaios de carbonatação acelerada dos concretos com adições minerais com as misturas de referência de cimento Portland.
- Observar a influência do teor de hidróxido de cálcio remanescente sobre a carbonatação;
- Observar as relações entre a água combinada e a carbonatação.
- Observar a influência dos poros menores que 10 nm na carbonatação.

Bem como, baseado nos resultados, obtidos em ensaios de laboratório, e nas discussões apresentadas no capítulo anterior, pode-se concluir:

### **6.1 INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS E DA CAL NA CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS**

O coeficiente de carbonatação, quando analisado por camadas, é aproximadamente 2 vezes maior para o traço R75 em relação ao R40, tendo em vista que o primeiro concreto é mais poroso.

Nos concretos com adição de cinza volante, o traço CV40 apresentou uma variação no coeficiente de carbonatação em torno de 10% da camada 1 para camada 3, já para o traço CV75, os valores foram superiores a 2,5 vezes aos resultados obtidos nos traços CV40, isso porque ocorreu a carbonatação total do corpo-de-prova do primeiro.

Nos concretos com cinza volante e cal, o traço CV40C apresentou uma variação no coeficiente de carbonatação em torno de 2% da camada 1 para camada 3, já para o traço CV75C os valores foram superiores a 17 mm/sem<sup>0,5</sup>, e o acréscimo de mais de 3 vezes em relação aos traços

CV40C, isso porque ocorreu a carbonatação total do corpo-de-prova do primeiro. Observou-se que as variações entre as camadas 1 e 3 não foram muito grandes: a maior diferença ocorreu para o traço R40 (-14%), com tendência de decréscimo da superfície para o interior. Para os demais traços as variações foram inferiores a 10%, sendo que apenas o traço CV40 e CV75C apresentaram tendências de aumento da carbonatação da camada 1 para a 3.

## **6.2 COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO X HIDRÓXIDO DE CÁLCIO REMANESCENTE**

Para os traços de referência, pode-se observar que o traço R75 apresentou valores para o coeficiente de carbonatação superiores a 200% que o traço R40, porém o teor de hidróxido de cálcio remanescente o traço R40 apresentou valores, em média, 3 vezes maiores. No traço R40 detectou-se aparente incongruência nos resultados porque a camada 1 apresentou maior teor de CH que o da camada 3, enquanto que a carbonatação também decresceu da camada 1 para a 3. Esta queda não foi muito acentuada mas o teor de CH na camada 3 é 2,8 vezes menor do que na 1.

Para os traços com cinza volante pode-se observar que o CV75 apresentou valores para o coeficiente de carbonatação em média 2,5 vezes superiores ao traço CV40, o teor de hidróxido de cálcio remanescente no traço CV40 decresceu lentamente da camada 1 para camada 3, já no traço CV75 não foi detectada tendência de variação.

No traço CV40, o teor de CH decresceu da camada 1 para 3, aproximadamente 4,5 vezes, enquanto a carbonatação cresceu 10%, o que neste caso foi um comportamento coerente, ou seja, maiores carbonatações se traduzem em menores teores de CH.

Já nos traços com cinza volante e cal, o CV75C apresentou valores para o coeficiente de carbonatação em média 3 vezes superiores ao traço CV40C, já o teor de hidróxido de cálcio remanescente no traço CV40C os valores superaram os do traço CV75C. No traço CV40C observou-se pequena variação de 5% no teor de CH da camadas 1 e 3, com praticamente au-

sência de alterações na carbonatação. Provavelmente a maior compacidade dada pela presença de CH adicional foi o responsável pela maior homogeneidade do teor entre as camadas. Para o traço CV75C detectou-se aumento de 4,5% no teor de CH da camada 1 para 3, com acréscimo na carbonatação de 9%. O valor menor de CH na superfície, poderia ser explicado pelo efeito de lixiviação, pela água da chuva e pela maior porosidade devido ao efeito parede.

Observou-se que no traço CV40 com e sem cal, que o teor de CH aumentou 2,3 vezes na camada 1 do traço CV40, para o CV40C, enquanto que na camada 3 o aumento foi de 10,8 vezes.

### **6.3 COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO X ÁGUA COMBINADA**

Nos traços de referência, pode-se observar que no R40 a carbonatação decresceu da camada 1 para a 3 de 14%, enquanto que para a água combinada o decréscimo foi de 39%. Para o R75 a carbonatação permaneceu quase constante enquanto que a água combinada decresceu de 14% da 1 para 3 camada.

Nos traços com cinza volante observou-se que o CV40 apresentou aumento da carbonatação e da água combinada da camada 1 para a 3, ambos da ordem de 10%, provavelmente devido a menor quantidade de CH na superfície. Já o traço CV75, devido a carbonatação total do corpo-de-prova, não é possível estabelecer relações, embora a variação da água combinada entre as camadas 1 e 3 tenha crescido 14%, da mesma forma que o CH.

Os resultados obtidos nos traços da relação  $a/mc = 0,40$  observou-se que o traço com cinza volante e cal, ao contrário dos outros dois, foi o único que mostrou um crescimento do teor de água combinada em 0,1% com o aumento da profundidade (camada 1 para camada 2) e da camada 2 para 3 o aumento foi de 0,64%. O traço com cinza volante e cal apresentou teores, respectivamente, 1,5, 1,9 e 2,4 vezes maiores que os teores observados nas camadas 1, 2 e 3 do traço de referência foram 1,8, 2,0 e 2,2 vezes maiores que os teores de CV40 nas mesmas camadas.

No traço CV75C, entre as camadas 1 e 3, a carbonatação aumentou 9%, enquanto que a água combinada 131%, o que mostrou a vantagem da cal para os traços com maior porosidade, em termo de aumento da quantidade de formação de C-S-H. Em comparação com o traço CV40C, o traço CV75C apresentou valores 2,9, 1,3 e 1,4 vezes menores nas camadas 1, 2 e 3, respectivamente, ocasionado pelo menor teor de cimento e maior dimensão dos poros (maior diâmetro crítico).

#### **6.4 COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO $\times \varnothing < 10 \text{ nm}$**

Os traços de referência mostraram que ocorreu um aumento de 2,2 vezes no percentual de poros com diâmetro menor que 10 nm do traço R40 em relação ao R75, este aumento, no traço R40, da camada 1 para camada 3 foi de 9% enquanto para carbonatação foi de 14%, variações não muito discrepantes. Já no traço R75 a variação da camada 1 para 3 foi de 128% para os poros inferiores a 10 nm, enquanto que para a carbonatação não pode ser realizada avaliação devido à neutralização total do corpo-de-prova.

Os traços com cinza volante apresentaram uma maior porcentagem de poros na faixa de diâmetros menores que 10 nm. Na camada 3, essa tendência se acentuou, pois verificou-se que todos os traços com cinza volante tiveram uma maior quantidade de poros de diâmetro menor que 10 nm nesta profundidade.

Os efeitos das variações, nos poros menores de 10 nm, não se refletiram muito na carbonatação, visto que as variações entre as camadas 1 e 3 foram menores de 10%, mostrando que o refinamento dos poros, devido a adição de cinza volante ao traço, diminuindo a difusão do  $\text{CO}_2$ , não sobrepujam o efeito da diminuição do teor de hidróxido de cálcio. Nos traços com cinza volante sem cal, percebeu-se uma tendência maior de refinamento dos poros à medida que aumenta a profundidade de estudo, sendo que a quantidade de poros com diâmetros nesta faixa, na camada 3 foi mais pronunciada.

Notou-se que a adição de cal, gerou moléculas de grandes dimensões ao traço com cinza volante, o que fez com que o traço sem cal apresentasse

um menor teor de poros com diâmetro menor que 10 nm. A camada 1 do traço CV75 apresentou teores menores do que para a mistura com cal, mostrando que a cal trouxe maior refinamento para a superfície do que para a camada 3, enquanto que as oscilações da carbonatação foram menos relevantes.

## **6.5 RELACIONAMENTO ENTRE TRAÇOS**

Observou-se que o coeficiente de carbonatação e o percentual de poros com diâmetro menor que 10 nm foram maiores para o traço CV40 em relação ao traço R40, já o hidróxido de cálcio remanescente e o teor de água combinada foram maiores para o traço sem cinza volante.

Observou-se que, entre camadas 1 e 3, ocorreu uma tendência de leve diminuição do coeficiente de carbonatação, no traço CV40, em relação ao R40, devido ao maior aumento dos diâmetros dos poros menores de 10 nm. O teor de CH apresentou maior amplitude entre camadas 1 e 3 para o traço R40, enquanto que para o CV40 a maior variação ocorreu entre camadas 1 e 2, indicando que a camada superficial consumiu menos CH, ou seja, apresentou menor teor de C-S-H secundário devido a maior porosidade e sensibilidade à cura ambiental.

Para o traço R40 a água combinada apresentou variação de teores de mais de 1% entre camadas 1 e 3, enquanto que para o CV40 as oscilações foram menores, da ordem da metade da anterior, evidenciando que o refinamento dos poros se deu não só por efeito químico, mas também pelo efeito físico. Estes efeitos não influíram muito sobre a carbonatação, tendo em vista que houve aumento de cerca de 100% desta com a adição de cinza volante em relação ao traço de referência, mostrando que o efeito da queda da reserva alcalina foi muito mais importante do que o refinamento dos poros.

Apesar do teor de CH e água combinada do traço CV75 terem se mantido na mesma faixa de variação do traço CV40, seus efeitos sobre a carbonatação não foram muito sensíveis, desde que houve aumento do patamar de 10 mm/sem<sup>0,5</sup> deste último para >25 mm/sem<sup>0,5</sup> do primeiro, sugerindo

que o aumento da porosidade (relação  $a/ag$ ), efeito físico, preponderou sobre a menor taxa das reações pozolânicas e de hidratação, efeito químico.

Os traços com baixa relação  $a/ag$  (0,40), com cinza volante e cal apresentaram um coeficiente de carbonatação praticamente coincidente com os do traço de referência. Os teores de CH aumentaram da ordem de 3 vezes e o de água combinada cerca de 2 vezes, enquanto que o teor de poros menores de 10 nm mantiveram praticamente os mesmos teores dos traços sem cal. Conclui-se que a carbonatação dos traços com baixa relação  $a/ag$  depende mais do teor de CH nos poros intersticiais (ação química) do que do efeito físico do refinamento dos poros (efeito físico).

Observou-se que, entre as camadas 1 e 3, para as quatro variáveis, as amplitudes da variação total foram menores para o traço com cal, em relação ao CV40, evidenciando que a ação da cal propiciou maior quantidade de compostos hidratados, tornando a microestrutura da pasta cimentícia mais homogênea, diminuindo as diferenças entre a superfície e o interior do concreto.

A homogeneidade que a cal ofereceu para a microestrutura dos traços com relação  $a/ag$  0,40, entre a superfície e o interior, não se reproduziu para os traços com relação 0,75, provavelmente pelo maior afastamento entre as partículas das superfícies dos poros, possibilitando maior interação com a variação dos agentes ambientais, do que nos traços com menor permeabilidade.

No cruzamento entre os traços CV40 e CV40C, percebeu-se um decréscimo da carbonatação a quase pela metade do traço com cal em relação ao traço sem cal, devido ao aumento do teor de CH, da ordem de 3 vezes e do teor de água combinada, cerca de 2 vezes. Este comportamento denotou que a queda da carbonatação não foi proporcional ao aumento do CH, porque existiu uma interação desta com a estrutura dos poros que foi alterada devido ao maior tamanho das moléculas de CH nos interstícios. Observou-se este fato pela leve queda no teor de poros menores de 10 nm. A camada 3 foi a que mais se beneficiou com a adição de cal, invertendo-se seu menor desempenho no traço CV40 em relação ao CV40C, no que tange ao teor e

CH e água combinada. Para a carbonatação não houve praticamente variação entre as camadas, seja nos traços com cal, seja nos sem cal.

Em traços com porosidade mais elevada, CV75 e CV75C, na camada superficial, que são mais sensíveis à adição de cal do que os traços com relação  $a/ag$  menores, a camada 3 foi a que mais se beneficiou com a adição de cal, pois foi a que apresentou maior teor de CH, água combinada e poros menores de 10 nm, evidenciando que o menor desempenho da camada 1 devido a cal, se inverteu a partir da profundidade de 20 mm (camada 2), tornando o concreto menos poroso no interior da peça em relação à superfície.

## 6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em resumo, pode-se concluir:

- que a variação do coeficiente de carbonatação entre a superfície e a profundidade de 50 mm mostrou tendência de decréscimo para o traço de referência e de acréscimo para os traços com cinza volante, com e sem cal. Entretanto, para estas últimas, as variações foram inferiores a 10%, próximas à variabilidade do próprio ensaio;
- a substituição de cimento por 50% de cinza volante aumentou, em média, em 100% a velocidade da carbonatação, enquanto que a adição de 20% de cal a estes traços fez com que o acréscimo médio baixasse para 20%, em média;
- o teor de hidróxido de cálcio entre a superfície e 50 mm de profundidade, para relações  $a/ag = 0,40$ , duplicou para os traços de referência e triplicou para os com cinza volante, sem cal. Para os traços com cal as diferenças foram muito pequenas. Para  $a/ag = 0,75$ , estes últimos traços foram o que apresentaram maior teor de CH, superiores inclusive ao referência;
- os teores de água combinada apresentaram valores coerentes com os do hidróxido de cálcio, mostrando a validade dos resultados, visto que ambos dependem das reações de hidratação;



- constatou-se pouca influência dos diâmetros de poros menores de 10 nm sobre a carbonatação, entre camadas 1 e 3, visto que as diferenças sobre os valores de  $k_c$  foram inferiores a 10%;
- a camada 3, a 50 mm da superfície, foi a que mais se beneficiou com a adição de cal em relação ao concreto de referência pois apresentou coeficiente de carbonatação de apenas 40% superior, teor de CH 5,8% mais alto, teor de água combinada 4% maior e, finalmente, teor de poros menores de 10 nm 10,6% mais elevados. A camada 2 apresentou valores bastante inferiores, próximos ao da camada 1.

## **6.7 PROPOSTAS PARA NOVOS ESTUDOS**

Para futuros trabalhos na área, poderão ser estudadas outras adições minerais, tais como: escoria de alto forno e cinza de casca de arroz com outros teores de cal hidratada para que se determine um percentual ideal para as adições.

Para determinação do coeficiente de carbonatação, propõe-se a realização de ensaios com menores espaçamentos entre as leituras, principalmente nos traços com maiores relações  $a/a_g$ , tendo em vista que nestes traços ocorreram a carbonatação total do corpo-de-prova, não possibilitando o cálculo dos coeficientes com número adequado de dados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Editora Pini, 2000.

ALMEIDA, I.R. **Carbonatação de concretos de alta resistência com aditivos químicos e naturais**. IBRACON, Reunião Anual de 1991, São Paulo 26 a 30 de agosto.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Guia Básico de utilização do cimento Portland** 3º edição São Paulo, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 5732: Cimento Portland comum**. Rio de Janeiro, 1991a.

\_\_\_\_\_. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994a.

\_\_\_\_\_. **NBR 5747: Análise Química de Cimento Portland: determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama**. Rio de Janeiro, 1989.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 6467: Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo**. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 6471: Cal virgem e cal hidratada - retirada e preparação da amostra**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. NBR 6473: **Cal virgem e cal hidratada - Análise Química**. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. NBR 6474: **Cimento Portland e outros materiais em pó, determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 7215: **Cimento Portland: determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. NBR 7217: **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. NBR 7223: **Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. NBR 7224: **Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da área específica**. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 7251: **Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária**. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. NBR 7809: **Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro**. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. NBR 7810: **Agregado em estado compactado e seco - Determinação da massa unitária**. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. NBR 9203: **Cimento Portland comum e clínquer - Análise**. Rio de Janeiro, 1985.

\_\_\_\_\_. NBR 9206: **Cal hidratada para argamassas - Determinação da plasticidade**. Rio de Janeiro, 1985.

\_\_\_\_\_. NBR 9211: **Agregados para concreto**. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. NBR 9289: **Cal hidratada para argamassas - Determinação da finura**. Rio de Janeiro, 2000.

\_\_\_\_\_. NBR 9776: **Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman**. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. NBR 9937 **Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregados miúdos**. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. NBR 11581: **Cimento Portland: determinação dos tempos de pega**. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. NBR 11579: **Cimento Portland: Determinação da finura por meio da peneira n.º 200**. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. NBR 12989: **Cimento Portland branco**. Rio de Janeiro, 1993.

\_\_\_\_\_. NBR 13116: **Cimento Portland de baixo calor de hidratação**. Rio de Janeiro, 1991f.

\_\_\_\_\_. NBR NM 23: **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2001a.

\_\_\_\_\_. NBR NM 26: **Agregados - Amostragem**. Rio de Janeiro, 2001b.

\_\_\_\_\_. NBR NM 33: **Concreto - Amostragem de concreto fresco**. Rio de Janeiro, 1998a.

\_\_\_\_\_. NBR NM 52: **Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2003a.

\_\_\_\_\_. NBR NM 53: **agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2003b.

\_\_\_\_\_. NBR NM 67: **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1998b.

\_\_\_\_\_. NBR NM 68: **Concreto - Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff**. Rio de Janeiro, 1998c.

\_\_\_\_\_. NBR NM 248: **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003c.

BIER, T.A ; KROPP, J.; HILSDORF, H.K. **The formation of silica gel during carbonation of cementitious systems containing slag cements**. In: Malhotra, V. M. (ed.) International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 3rd, Trondheim, 1989. *Proceedings*. American Concrete Institute, Detroit, 1989.

CAMPITELI, V. C. **Porosidade do Concreto**. São Paulo, 1987. Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil. BT-09/87.

CASTRO, P.; MORENO, E.I.; GENESCÁ, J. **Influence of marine microclimates on carbonation of reinforced concrete buildings**. CEMENT AND CONCRETE RESEARCH - N.º30 - 2000.

COOK, D.J.; SUWANVITAYA, P. **Properties and behaviour of lime-rice husk ash cements**. In: Malhotra, V.M. (ed)- First International Conference on Fly ash, silica fume, slag and others by-products in Concrete, Canada 1983, Proceedings- American Concrete Institute, Vol. 2.

FRIZZO, B. T. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto**. Santa Maria, 2001. 135 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2001.

GASTALDINI, A. L. G. et al. **Influência das adições minerais na porosidade de pastas de cimento Portland**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4º, São Paulo, 1996. Anais. São Paulo: ABCP, 1996.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal- Fundamentos e aplicações na Engenharia Civil**. Editora Pini. São Paulo -1997.

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.

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

ISAIA, G. C. **Cinzas volantes nos concretos: Importância e aplicações**. Revista Latino Americana de Engenharia. Vol. 1 - N.º 1 - Santa Maria - 1992.

\_\_\_\_\_. **Enfoque crítico sobre concretos com altos teores de cinzas volantes frente a corrosão das armaduras**. In: Instituto Brasileiro do Concreto, 1992. Reunião Anual. Curitiba, 1992.

\_\_\_\_\_. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. São Paulo, 1995 - Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995.

\_\_\_\_\_. **Carbonatação do concreto: uma revisão**. 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: Instituto Brasileiro do Concreto.

ISAIA, G.C., VAGHETTI, M.A., GASTALDINI, A.L. **Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar**. Foz do Iguaçu, Paraná, 2001. 43º Congresso Brasileiro do Concreto.

JIANG, L; LIN, B.; CAI, Y. **A model for predicting carbonation of high-volume of fly ash concrete**. Cement and Concrete Research, 30, pp 699- 702, 2000.

JOHN, V.M., TUDISCO, M. **Durabilidade e carbonatação do concreto armado na revisão da NBR 6118**. Seminário Qualidade e Durabilidade das Estruturas de concreto - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto-Alegre, 08/09 dezembro, 1993.

KAZMIERCKAZ, C. S., HELENE, P.R.L. **Estimativa e determinação da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto.** Seminário Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto-Alegre, 08/09 dezembro, 1993.

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.

KOKUBU, M; NAGATAKI, S. **Carbonation of concrete with fly-ash and corrosion of reinforcements in 20-years tests.** In: Malhotra, V. M. (ed.) International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 3rd, Trondheim, 1989. *Proceedings*. American Concrete Institute, Detroit, 1989.

MIRA P., PAPADAKIS V. G., TSIMAS S. **Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete.** CEMENT AND CONCRETE RESEARCH, USA: Pergamon Press, 2002.

NAGATAKI, S.; OHGA, H. **Combined effect of carbonation and chloride on corrosion of reinforcement in fly ash concrete.** ACI Proceedings 1992.

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.** 2. ed. São Paulo : Ed. Pini, 1997.

PAPADAKIS,V.G., FARDIS, M.N., VAYENDAS, C.G. **Fundamental Concrete Carbonation Model and Application to Durability of Reinforced Concrete.** In: Baker, J.M. et alli. Durability of Building Materials and Components. Brighton, UK, E & FN SPON, 1990.

PAPADAKIS, V.G.; VAYENAS, C.V.; FARDIS, M.N. **Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation.** ACI Materials Journal, n.88, 1991.

PAPADAKIS, V.G.; **Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress.** Cement and Concrete Research, 2000.

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

ROSENBERG; A. **Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete** "Materials science of concrete/ edited by P. Skalny" - 1989 - The American Ceramic Society - Westerville, OH - USA.

SARKAR, S.L. **Roles of sílica fume, slag and fly ash in the development of high-performance concrete microstructure.** In: MALHOTRA, V.M. (ed). INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 5rd. Milwaukee, 1995.

SILVA, N.I.W.; CALARGE, L.M.; CHIES, F.; MALLMANN, J.E.; ZWONOK, O. **Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico.** Cerâmica vol.45 n.º 296 - São Paulo - nov/ dez. 1999.

SILVEIRA, A. A., FERREIRA, A. A, DAL MOLIN, D. **A cinza de casca de arroz como adição mineral.** In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL. USP. São Paulo, 1996.

SILVEIRA, R. G. **Estudo da microestrutura da camada de cobrimento de concretos com altos teores de cinza volante.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria, 2004.

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

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. **Estrutura e apresentação de monografias, dissertações e teses:** MDT. 5ª ed. Santa Maria, 2000.

VAGHETTI, M. A. O. **Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação de concreto de cimento Por-**



**tl**and. Dissertação de Mestrado. – Universidade Federal de Santa Maria, 1999.

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

WOLF, J.; DAL MOLIN, D. **Carbonatação de argamassas e concretos - Fatores intervenientes** - Simpósio sobre a Patologia das Edificações - Prevenção e Recuperação. Porto Alegre / RS. 24 e 25 de outubro de 1989.

# ANEXOS

Anexo 1 – Rotina "COTA.LSP" para o dimensionamento da frente de carbonatação.

```

.....
::: COTA.LSP
::: Rotina que extrai a dimensão de linhas
::: salvando os valores em um arquivo Excel.
::: ELINOR FERNANDO DALLA LANA
.....
(defun c:cota ()
  (setvar "cmdecho" 0)
  (setvar "osmode" 0)
  (setvar "blipmode" 0)
  (setvar "cmdecho" 0)
  (setvar "dimdec" 2)
  (command "ucs" "")
  (command "osnap" "none")
  (command "layer" "make" "COTAS" "color" "170" "COTAS" "")
  (command "-style" "dalla" "technic_.ttf" "" "" "" "" "")
  (prompt "\nselecione as linha com um retangulo.")
  (setq p1 (getpoint "\nPrimeiro ponto:"))
  (setq p2 (getcorner p1 "\nsegundo ponto na diagonal:"))
  (setq alt 0.25)
  (setq sel (ssget "c" p1 p2))
  (if (/= sel nil)
    (setq nsel (sslenght sel)))
  (setq ind 0)
  (while (< ind nsel)
    (setq nome (ssname sel ind))
    (setq tipo (cdr (assoc 0 (entget nome))))
    (if (= tipo "LINE")
      (progn
        (setq pt1 (cdr (assoc 10 (entget nome))))
        (setq ptf (cdr (assoc 11 (entget nome))))
        (setq dis (distance pt1 ptf))
        (setq ang (angle pt1 ptf))
        (setq ang2 (/ (* ang 180) pi))
        (setq ptm (polar pt1 ang (/ dis 2)))
        (if (and (> ang2 90) (< ang2 270))
          (progn
            (setq ang2 (- ang2 180))
            (setq ptm (polar ptm (- ang 90) (/ alt 2))))
          (setq ptm (polar ptm (+ ang 90) (/ alt 2))))
        (setq dis (rtos dis 2 2))
        (command "_.text" "j" "c" ptm alt ang2 dis)
        (setq gravar (open "c:\\CV40E13.xls" "a"))
        (write-line dis gravar)
        (close gravar)
        (setq ind (+ 1 ind)))
      (setq ind (+ 1 ind))))
    (setvar "cmdecho" 1)
  )
)

```