



**UFSM**

**Dissertação de Mestrado**

**ESTUDO DA MICROESTRUTURA DA CAMADA DE  
COBRIMENTO DE CONCRETO COM ALTOS  
TEORES DE CINZA VOLANTE**

---

**Rodrigo Goettems da Silveira**

**PPGEC**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2004**

**ESTUDO DA MICROESTRUTURA DA CAMADA DE  
COBRIMENTO DE CONCRETO COM ALTOS  
TEORES DE CINZA VOLANTE**

---

**por**

**Rodrigo Goettems da Silveira**

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**

**2004**

**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

**ESTUDO DA MICROESTRUTURA DA CAMADA DE  
COBRIMENTO DE CONCRETO COM ALTOS  
TEORES DE CINZA VOLANTE**

elaborada por  
**Rodrigo Goettems da Silveira**

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 Dal Molin - UFRGS

Santa Maria, 27 de fevereiro de 2004.

Aos meus pais Nilo e Anemary, pelo carinho, apoio, compreensão e incentivo.

(...)

**There is a crack, a crack in everything...  
That's how the light gets in...**

(...)

(Leonard Cohen)

## AGRADECIMENTOS

Seria injusto nomear uma por uma todas as pessoas que, de alguma maneira, colaboraram nesta pesquisa, pelo fato de que, fatalmente, eu esqueceria de um ou outro nome, visto que foram muitas pessoas envolvidas. Porém, alguns nomes são imprescindíveis. Aos outros, agradeço de forma genérica, na esperança de contemplar a todos, afinal... eles sabem quem são. Agradeço portanto:

- Ao professor Dr. Geraldo Cechella Isaia, pela amizade, orientação e incentivo e balizamento na realização deste trabalho;
- Ao professor Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini, que, com suas aulas na graduação, estimulou meu interesse pela tecnologia do concreto, pela disponibilidade e pelas importantes colaborações;
- Aos colegas do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Elinor Fernando Dalla Lana, Bianca Moreira, Fabiano Missau e, em especial, à Simone Bassan Petry;
- Ao colega Eng. Régis Moraes, por sua colaboração e pelo gerenciamento da pesquisa;
- Aos alunos bolsistas do Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON / UFSM);
- Ao professor Dr. Aleir Antônio De Paris, do Laboratório de Microscopia Eletrônica, pela disponibilidade e atenção durante os ensaios de MEV;
- Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC / UFSM), pela cessão de suas instalações e pela atenção e ajuda de seus funcionários;
- À Universidade Federal de Santa Maria, instituição que viabilizou minha formação no curso de Engenharia Civil e esta Pós-Graduação;

- Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSM, seus professores e funcionários;
- Ao CNPq, pelos recursos concedidos;
- A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização desta pesquisa.

Muito obrigado!!!

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	x
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>RESUMO</b> .....	xvi
<b>ABSTRACT</b> .....	xvii
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>CONSIDERAÇÕES SOBRE A CAMADA DE COBERTURA DO</b>	
<b>CONCRETO</b> .....	6
1.1 <b>Distribuição dos Poros</b> .....	6
1.2 <b>Ensaio laboratoriais X Estrutura real</b> .....	10
1.3 <b>Importância da Camada de Cobrimento</b> .....	13
1.4 <b>Importância do Nível de Resistência no Cobrimento</b> .....	15
1.5 <b>Microestrutura da camada de cobertura</b> .....	17
1.6 <b>Concretos com altos teores de cinza volante</b> .....	27
1.7 <b>Sustentabilidade</b> .....	34
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	38
2.1 <b>Objetivos</b> .....	38
2.2 <b>Variáveis envolvidas</b> .....	39
2.2 <b>Materiais utilizados</b> .....	41
2.2.1 <b>Materiais Cimentícios</b> .....	41
2.3.1.1 <b>Cimento</b> .....	41
2.3.1.2 <b>Pozolana</b> .....	42
2.3.1.3 <b>Cal</b> .....	43
2.2.2 <b>Agregados</b> .....	44

2.3.2.1. Agregado Miúdo .....	44
2.3.2.2. Agregado Graúdo .....	45
2.3.3. Aditivo Químico .....	46
<b>2.3 Dosagem</b> .....	46
2.3.1 Nomenclatura utilizada .....	48
<b>2.5. Moldagem dos Protótipos e CPs</b> .....	50
<b>2.6 Ensaio Realizados</b> .....	54
2.6.1 Resistência à Compressão .....	54
2.6.1.1. Considerações sobre os CPs moldados e testemunhos extraídos .....	56
2.6.2 Água combinada .....	56
2.6.3 Porosimetria .....	58
2.6.4 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura .....	59
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	62
<b>3.1 Análise dos resultados de Resistência à Compressão</b> .....	63
3.1.1 Análise conjunta dos resultados de 28 e 91 dias .....	64
3.1.2 Análise da relação CPs moldados X Testemunhos aos 28 dias ..	68
3.1.3 Análise da relação CPs moldados X Testemunhos aos 91 dias ..	72
3.1.4 Discussão geral dos resultados de resistência à compressão .....	77
<b>3.2 Análise dos resultados de Porosimetria</b> .....	78
3.2.1 Análise da distribuição dos tamanhos dos poros em igualdade de relação a/mc .....	78
3.2.1.1 Diâmetro crítico .....	78
3.2.1.2 Poros menores que 10 nm (poros do gel) .....	82
3.2.1.3 Poros entre 10 e 50 nm (capilares médios) .....	84
3.2.1.4 Poros maiores que 50 nm (capilares grandes) .....	86
3.2.1.5 Análise global das dimensões dos poros por traço .....	89
3.2.2. Discussão dos resultados dos ensaios de porosidade .....	94
<b>3.3 Análise dos dados de Água Combinada</b> .....	95
3.3.1 Análise em igualdade de relação a/mc .....	96

3.3.2 Análise conjunta dos resultados em igualdade de relação a/mc ..	101
<b>3.4 Análise das micrografias do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura .....</b>	<b>104</b>
3.4.1 Análise geral das micrografias .....	118
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>120</b>
<b>4.1 Resistência à Compressão .....</b>	<b>120</b>
<b>4.2 Distribuição das dimensões dos poros .....</b>	<b>122</b>
<b>4.3 Teor de água combinada .....</b>	<b>123</b>
<b>4.4 Ensaio de MEV .....</b>	<b>124</b>
<b>4.5 Considerações Finais .....</b>	<b>124</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>126</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>136</b>

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Características físicas e químicas do cimento .....	42
TABELA 2 – Quantidade de materiais por m <sup>3</sup> de concreto .....	49
TABELA 3: Resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio. ....	94
TABELA 4: Teores de água combinada em cada traço .....	96

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: Classificação dos poros, segundo Mindess & Young (1981) .....	7
QUADRO 2: Composição Química dos materiais .....	43
QUADRO 3 – Características físicas dos agregados .....	45
QUADRO 4: Resultados de 28 dias (MPa) .....	63
QUADRO 5: Resultados de 91 dias (MPa) .....	63

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Características físicas do concreto segundo suas dimensões. Fonte: Mehta & Monteiro (1994) .....	8
FIGURA 2: Três tipos de patologias na camada de cobertura causadas pela corrosão da armadura (Neville, 1997) .....	14
FIGURA 3: Distribuição dos poros a partir da superfície segundo Yuasa (2000) .....	26
FIGURA 4.: Preparação das formas para posterior moldagem.....	51
FIGURA 5: Formas já preparadas para a moldagem .....	52
FIGURA 6: Processo de moldagem e vibração dos protótipos .....	52
FIGURA 7: Protótipos durante a primeira semana de cura .....	53
FIGURA 8: Protótipos curando ao ar livre .....	53
FIGURA 9: Dimensões e furos dos protótipos .....	55
FIGURA 10: Extração dos testemunhos dos protótipos .....	55
FIGURA 11: Marcação das profundidades a serem pesquisadas .....	57
FIGURA 12: Detalhe da extração do pó dos protótipos .....	58
FIGURA 13: Amostras em recipiente à vacuo, sendo pulverizadas com ouro .....	61
FIGURA 14: Vista geral do microscópio eletrônico de varredura .....	61
FIGURA 15: Resistência à compressão aos 28 e 91 dias para todas as a/mc .....	65
FIGURA 16: Variação da resistência à compressão aos 28 dias entre CPs e testemunhos extraídos. ....	69
FIGURA 17: Variação da resistência à compressão aos 28 dias entre CPs e testemunhos extraídos para todas as a/mc .....	71
FIGURA 18: Variação da resistência à compressão aos 91 dias entre CPs e testemunhos extraídos .....	73
FIGURA 19: Variação da resistência à compressão aos 91 dias entre CPs e testemunhos extraídos para todas as a/mc .....	75

FIGURA 20: Variação do diâmetro crítico com o aumento da profundidade da camada de revestimento .....	79
FIGURA 21: Diâmetro crítico dos poros para cada traço .....	81
FIGURA 22: Porcentagem de poros menores que 10 nm por camada .....	82
FIGURA 23: Poros menores que 10 nm em cada traço .....	83
FIGURA 24: Porcentagem de mesoporos em cada profundidade .....	84
FIGURA 25: Porcentagem de mesoporos em cada traço .....	85
FIGURA 26: Porcentagem de macroporos em cada profundidade .....	86
FIGURA 27: Porcentagem de macroporos em cada traço .....	88
FIGURA 28: Diâmetro dos poros por profundidade dos traços .....	90
FIGURA 29: Teor de água combinada em cada traço para a/mc de 0,40. ....	97
FIGURA 30: Teor de água combinada em todos os traços para a/mc de 0,75. ....	99
FIGURA 31: Teor de água combinada em cada camada dos traços. ...	102
FIGURA 32: Teor de água combinada em cada camada. ....	103
FIGURA 33: Superfície de amostra da camada 1 do traço R45 ampliada 1500 X. ....	105
FIGURA 34: Superfície de amostra da camada 3 do traço R45 ampliada 3000 X. ....	106
FIGURA 35: Superfície de amostra da camada 1 do traço R80 ampliada 3000 X. ....	107
FIGURA 36: Superfície de amostra da camada 3 do traço R80 ampliada 2700 X. ....	108
FIGURA 37: Superfície de amostra da camada 1 do traço CV40 ampliada 3000 X. ....	109
FIGURA 38: Superfície de amostra da camada 3 do traço CV40 ampliada 7500 X. ....	110
FIGURA 39: Superfície de amostra da camada 1 do traço CV75 ampliada 1500 X. ....	111

FIGURA 40: Superfície de amostra da camada 3 do traço CV75 ampliada 1500 X. ....	112
FIGURA 41: Superfície de amostra da camada 1 do traço CV40c ampliada 1500 X. ....	113
FIGURA 42: Superfície de amostra da camada 2 do traço CV40c ampliada 3300 X. ....	114
FIGURA 43: Superfície de amostra da camada 2 do traço CV40c ampliada 8000 X. ....	115
FIGURA 44: Superfície de amostra da camada 3 do traço CV40c ampliada 5500 X. ....	116
FIGURA 45: Superfície de amostra da camada 1 do traço CV75c ampliada 3300 X. ....	117
FIGURA 46: Superfície de amostra da camada 3 do traço CV75c ampliada 3500 X. ....	118

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### **ESTUDO DA MICROESTRUTURA DA CAMADA DE COBRIMENTO DE CONCRETO COM ALTOS TEORES DE CINZA VOLANTE**

Autor: Rodrigo Goettems da Silveira  
Orientador: Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia  
Santa Maria, 27 de fevereiro de 2004.

O aumento na durabilidade das estruturas de concreto acarreta maior vida útil das mesmas, influenciando diretamente na melhoria das construções e na qualidade de vida dos habitantes. Para que um estrutura seja durável é necessário que seja resistente aos agentes deletérios que percolam do meio ambiente para o interior do concreto, através dos poros da camada de cobertura, podendo atingir a armadura, causando o processo de corrosão. A redução das dimensões dos poros traz não apenas o aumento na resistência, mas proteção mais adequada para as armaduras pela maior oposição à percolação de fluidos. Na presente pesquisa foram estudados os principais fatores que influenciam na microestrutura da camada de cobertura do concreto. Neste estudo, avaliou-se as características da microestrutura da camada de cobertura de concretos com 50% de cinza volante (CV) em substituição ao cimento para duas relações água/materiais cimentícios ( $a/mc$ ), em três camadas a partir da superfície até uma profundidade de 60 mm; além da resistência à compressão do concreto nas idades de 28 e 91 dias para três  $a/mc$ , comparando corpos de prova moldados (CPs) e curados em condições controladas com testemunhos extraídos de protótipos curados ao ar livre. Visando repor a reserva de hidróxido de cálcio (CH) do concreto, em alguns traços foi adicionada cal hidratada em teores de 20%. Nos ensaios de resistência à compressão axial verificou-se que, em geral, nas relações  $a/mc$  mais baixas, os testemunhos extraídos apresentaram resistências superiores aos CPs. Foram realizados ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio para a determinação das dimensões e distribuição dos poros da camada de cobertura. Estes ensaios mostraram que a camada mais superficial do concreto apresenta porosidade mais aberta do que o interior. Verificou-se que, à medida em que aumentou a profundidade de estudo, mais densa apresentava-se a microestrutura do mesmo. Os ensaios de água combinada demonstraram que em concretos com relação  $a/mc$  maiores, aumentou o teor de produtos de hidratação com o aumento da profundidade estudada. Em traços com  $a/mc$  mais baixos e sem adição de cal, esta relação mostrou-se inversa. Os traços com cal apresentaram teores de água combinada mais altos nas camadas mais internas do concreto. Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram utilizados para a confirmação qualitativa das observações realizadas nos ensaios de porosidade.

## **ABSTRACT**

Dissertação de Mestrado  
Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### **ESTUDO DA MICROESTRUTURA DA CAMADA DE COBRIMENTO DE CONCRETO COM ALTOS TEORES DE CINZA VOLANTE (MICROSTRUCTURAL STUDY OF COVER CONCRETE WITH HIGH-VOLUME FLY ASH REPLACEMENTS LEVELS)**

AUTHOR: RODRIGO GOETTEMS DA SILVEIRA  
COORDINATOR: PROF. DR. GERALDO CEHELLA ISAIA

Local e Data da Defesa: Santa Maria, 27 de fevereiro de 2004.

The increase in the durability of the concrete structures causes greater useful life of the same ones, influencing directly in the improvement of the constructions and the quality of life of the inhabitants. So that a durable structure either is necessary that it is resistant to the aggressive agents who penetrate from the environment for the interior of the concrete, through the pores of the covering layer, being able to reach the reinforcement, causing the corrosion process. The reduction of the dimensions of the pores not only brings the increase in the resistance, but adjusted protection more for the steel for the biggest resistance to the fluid percolating. In the present research the main factors had been studied that influence in the microstructure of the layer of covering of the concrete. In this study, had been evaluated the characteristics of the microstructure of the covering of concrete with 50% of fly ash (FA) in substitution to the cement for two water/cementitious materials (w/cm) relations, in three layers from the surface until a depth of 60 mm; and the compressive strength of the concrete in the ages of 28 and 91 days for three w/cm, comparing molded samples (MSs) cured in controlled conditions with archetypes extracted samples cured outdoors. Aiming at to reconstitute the reserve of calcium hydroxide of the concrete, in some admixtures was added lime in amount of 20%. In the tests of axial compressive strength it was verified that, in general, in the lower w/cm relations, the extracted samples had presented higher strength than the MSs. Tests of mercury intrusion porosimetry for the determination of the dimensions and distribution of the pores of the covering layer had been carried through. These tests had shown that the most superficial layer of the concrete presents more open porosity than the interior one. It was verified that, with the increase of the depth of study, the microstructure of concrete was denser. The bound water tests had demonstrated that in concrete with bigger relation w/cm, it increased the amount of hydration products with the increase of the studied depth. In admixtures with lower w/cm and without lime addition, this relation revealed inverse. The admixtures with lime addition had presented bound water amount higher in the layers most internal of the concrete. The tests of search electronic microscopy (SEM) had been used for the qualitative confirmation of the comments carried through in the porosity tests.

# INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, grandes obras com estruturas e exigências técnicas complexas, impulsionaram o desenvolvimento de materiais com resistências mais elevadas e bom desempenho quanto à durabilidade.

Em nosso cotidiano, muito além dos limites de nossas residências, as exigências do mercado quanto à qualidade e maior durabilidade do produto do mercado imobiliário, aliado às linhas cada vez mais arrojadas dos projetos arquitetônicos, levam a indústria da construção civil a pesquisar e desenvolver materiais mais adequados a esses fins. Una-se à isto a busca das construtoras por certificações de qualidade e uma preocupação crescente com o desenvolvimento sustentável. Temos aí um cenário que impele as pesquisas na otimização do concreto, matéria prima da estrutura resistente da grande maioria das obras correntes no mundo atual.

O grande leque de utilizações do concreto em estruturas de prédios, pontes, barragens, plataformas *off shore*, pavimentos rígidos, tubulações, etc., nos dá uma idéia da importância deste material no desenvolvimento da civilização. Segundo Mehta & Monteiro (1994), o cimento Portland é o segundo material mais consumido no mundo, ficando atrás somente da água. Os gregos já conheciam, por volta de 500 – 300 A.C., o uso de um material semelhante ao concreto, feito com cinza vulcânica, para realizar suas obras de edificação e infraestrutura (Idorn, 1997 *apud* Isaia, 2001 [b]). Entretanto existe o relato de uma cisterna de concreto na ilha de Rhodes, construída aproximadamente em 2000 A.C., que se encontra em ótimo estado de conservação (Isaia, 2001 [b]).

O concreto é um material imprescindível para o progresso da civilização. Vivemos em um planeta com mais de seis bilhões de habitantes, cujas necessidades com habitação, saneamento, saúde,

educação, alimentação, etc., estão, ainda, longe de serem satisfeitas em uma proporção justa, visto que em sua totalidade é tarefa quase impensável. Para se chegar a níveis satisfatórios de progresso, há que se construir estradas, pontes, silos, habitações, obras de saneamento... Em tudo isso, há tecnologia, há a tecnologia do concreto, há o compromisso de técnicos, Arquitetos e Engenheiros com a durabilidade e o bom funcionamento de tais empreendimentos.

Há pouco mais de um século foi dado um grande passo na otimização deste material, com a adição de barras de aço ao concreto, em determinadas posições na estrutura, de modo que o conjunto resistente concreto + aço se tornasse mais adequado às solicitações mais comuns nas estruturas. Aço e concreto trabalham juntos, resistindo a tais solicitações, mas o papel principal neste sistema é do concreto, que além da resistência mecânica, tem papel determinante na proteção do aço quanto à corrosão e da integridade da própria estrutura, quanto a ataques de agentes agressivos, como sais, sulfatos, ácidos, etc.

Em pouco mais de um século de uso extensivo do concreto e do concreto armado em obras civis, ocorreram paralelamente pesquisas em tecnologia do concreto e houveram grandes progressos nesta área. Descobertas e experiências foram realizadas e postas em prática e hoje tem-se obras em todo o mundo onde a resistência à compressão do concreto ultrapassa os 100 MPa e as peças estruturais são mais esbeltas, resultando em maior área útil nas edificações e estruturas esteticamente surpreendentes. Inerente a isto, há um significativo aumento da vida útil das estruturas. Aí está a tecnologia do concreto, justificando os esforços, o tempo e os investimentos financeiros de entidades acadêmicas, professores, estudantes e técnicos.

No desenvolvimento de um concreto adequado às exigências técnicas e de mercado, destacam-se as características benéficas decorrentes do uso de pozolanas em substituição ao cimento. São muitos os benefícios de tal prática nas características físicas e químicas do concreto, bem como as vantagens econômicas; na medida em que a

pozolana substitui parte do cimento na mistura; e ecológica do uso dessas adições minerais que ontem só eram vistas ou utilizadas em laboratórios, hoje fazem parte do cotidiano de grandes obras e, amanhã, estarão sendo utilizadas até mesmo nos menores canteiros de obra. O que desenvolve-se ou descobre-se hoje nos laboratórios em breve começará a se tornar viável na prática de obras e logo atingirá a massa crítica necessária para promover mudanças na concepção dos métodos construtivos correntes, em busca de mais qualidade com menos desperdício. De nada adianta o conhecimento teórico ou empírico se não for corroborado pela prática em larga escala visando uma melhoria do material pesquisado ou do produto final.

Para esta pesquisa, usou-se a cinza volante como substituição à parte do cimento da mistura. Em particular, foram estudados os efeitos desta adição em algumas propriedades da camada de cobertura do concreto.

A camada de cobertura do concreto é a primeira proteção física do aço, por ser esta a parte mais sensível do conjunto *concreto armado*. À esta camada não se tem dado a devida atenção por parte dos profissionais da construção civil, principalmente durante a execução de estruturas em obras correntes. Tanto na fase de projeto quanto na execução, a importância da camada de cobertura tem sido deixada em segundo plano, visto que é dada mais atenção à resistência mecânica do conjunto concreto/aço. Mas, o atual cenário da construção civil, acima comentado, traz à Engenheiros e Arquitetos a preocupação e o cuidado não só com a resistência mecânica, mas também com a durabilidade de suas obras. Aí se insere uma maior atenção à camada de cobertura do concreto.

Na presente pesquisa, foi realizada uma avaliação quantitativa e qualitativa da camada de cobertura de protótipos moldados e curados ao ar livre, em três camadas de um centímetro de espessura cada, a partir da superfície do concreto. No concreto usado para a moldagem dos protótipos, além das misturas de referência, foi testada uma mistura com 50% de cinza volante (CV) em substituição à massa de cimento.

Pesquisas anteriores do Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECÓN) da UFSM (Frizzo, 2001; Hoppe, 2002; Stumpp, 2003) comprovam a viabilidade de altos teores de substituição na melhora das características microestruturais do concreto. Também foi executada uma terceira mistura com a adição de 20% de cal, em relação à massa de cimento, com o intuito de observar a influência desta adição sobre as propriedades pesquisadas, tendo em vista a reposição do teor de hidróxido de cálcio em relação à mistura de referência. Em pesquisas recentes do GEPECÓN (Hoppe, 2002; Stumpp, 2003), tal adição demonstrou bons resultados na melhoria das características físicas e químicas do concreto.

Foram estudadas as variáveis de microestrutura, porosidade e água combinada da camada de cobertura das três profundidades de concreto, a partir da superfície dos protótipos, para seis traços diferentes, com e sem adição de cal e com duas diferentes relações de água/aglomerante. Foi investigada também a resistência à compressão destes seis traços e de mais três relações água/materiais cimentícios (a/mc) intermediárias, em corpos-de-prova moldados e outros extraídos dos protótipos em duas idades, para três relações água/materiais cimentícios.

Cabe citar que a presente dissertação faz parte de um projeto de pesquisa mais amplo sobre a camada de cobertura do concreto que está sendo desenvolvida dentro do Grupo de Estudos e Pesquisa em Concreto (GEPECÓN) da UFSM, que foi subdividido em temas para quatro dissertações de mestrado, incluindo esta, abrangendo diversas variáveis ligadas à microestrutura e à durabilidade dos primeiros seis centímetros das peças estruturais. Com esta análise, pretende-se obter subsídios para uma avaliação e/ou projeto mais minucioso da camada de cobertura, visto ser esta, conforme já exposto, de grande importância para o aumento da vida útil do conjunto estrutural como um todo, bem como para o adequado desempenho da estrutura.

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira: o **Capítulo 1** apresenta uma revisão bibliográfica sobre a microestrutura da camada de

cobertura, adição de cinza volante e sustentabilidade; no **Capítulo 2** são apresentados os métodos de pesquisa utilizados nesta investigação, bem como as características dos materiais utilizados; o **Capítulo 3** apresenta os resultados obtidos e a análise destes resultados; o **Capítulo 4** diz respeito à discussão dos resultados e por fim, a Conclusão.

## CAPÍTULO I

# CONSIDERAÇÕES SOBRE A CAMADA DE COBERTURA DO CONCRETO

### 1.1 Distribuição dos Poros

Em termos de macroestrutura, o concreto é composto por duas fases distintas: a *pasta* e o *agregado*. Em uma abordagem em termos microscópicos, podemos considerar a chamada *zona de transição*, interface pasta/agregado, pelas suas diferenças de compostos e de poros e grande influência sobre as características físicas do concreto. Considerando-se o agregado como inerte, a durabilidade do concreto, função de suas características físicas e químicas, depende da pasta e da zona de transição.

A zona de transição não é constante, pois depende da composição da pasta, do agregado e do grau de hidratação do sistema (Bourdette *et al.*, 1995). Os mecanismos de transporte de fluidos e a porosidade destas duas fases, pasta e zona de transição, determinam o desempenho do concreto frente às solicitações a que é submetido, sejam elas mecânicas ou químicas, dependendo neste último caso do ambiente onde se encontra a estrutura. De acordo com Mindess & Young (1981), os poros se classificam, segundo seu tamanho, em capilares ( $> 10$  nm) e poros do gel ( $< 10$ nm). O Quadro 1, a seguir, mostra essa classificação.

QUADRO 1: Classificação dos poros, segundo Mindess & Young (1981, p. 99).

Designação	Diâmetro	Descrição	Papel da água	Propriedades da pasta afetadas
Poros capilares	10 $\mu\text{m}$ a 50 nm	Capilares grandes	Comporta-se como água de amassamento	Resistência, permeabilidade
	50 a 10 nm	Capilares médios	Forças moderadas de tensão superficial	Resistência, permeabilidade, retração com altos teores de umidade
Poros do gel	10 a 2,5 nm	Capilares pequenos (gel)	Fortes forças de tensão superficial	Retração com 50% de UR
	2,5 a 0,5 nm	Microporos	Água fortemente adsorvida, sem formação de meniscos	Retração, fluência
	< 0,5 nm	Microporos interlamelares	Água estrutural das ligações	Retração fluência

A Figura 1 a seguir mostra a classificação de Mehta & Monteiro (1994) para estas características. A figura apresenta, em escala logarítmica, o tamanho dos vazios (poros) em relação ao tamanho dos compostos formados na hidratação do cimento. Observa-se que há desde poros capilares, com dimensões de até 10 nm, até vazios de ar aprisionado, com dimensões que chegam à cerca de 5 mm. A quantidade de vazios contidos nesta faixa de tamanho tem influência determinante na resistência à compressão e percolação de gases e líquidos no concreto.

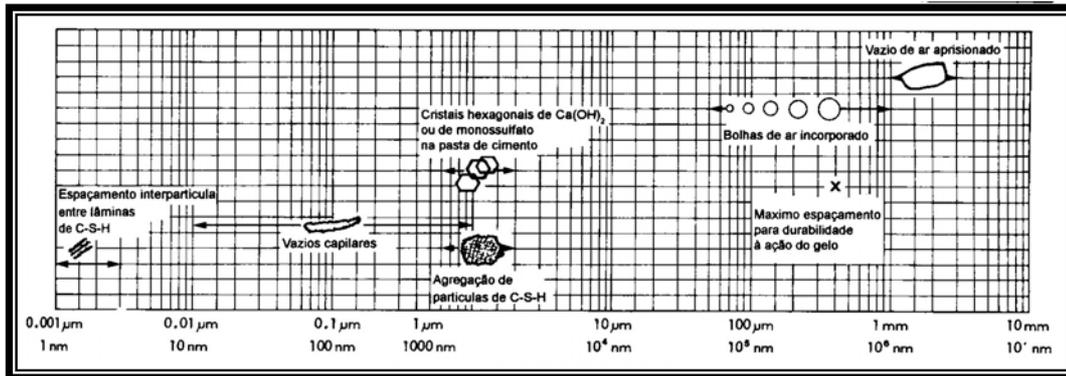


FIGURA 1: Características físicas do concreto segundo suas dimensões.  
 Fonte: Mehta & Monteiro (1994) .

O papel da água contida nos poros da microestrutura do concreto é muito importante, tendo em vista a grande influência que exerce sobre as propriedades da pasta de cimento.

A água é um dos elementos essenciais da pasta de cimento endurecida, pois toma parte nas reações de hidratação e , uma vez que o esqueleto estrutural tenha se formado, é atraída para as superfícies sólidas dentro do gel (Campiteli, 1987, p. 5).

A interconectividade dos poros, formando capilares, é a principal responsável pela permeação de fluidos através do concreto. Tais fluidos, sejam líquidos ou gases, trazem para o interior do concreto elementos que podem ser prejudiciais ao material.

Deve-se considerar, ainda, o efeito parede que se estabelece entre a pasta e o agregado. Devido a este efeito, ocorre um acúmulo de água na interface pasta/agregado, acarretando nesta zona um aumento da relação água/materiais cimentícios (a/mc), induzindo assim a formação de compostos de maior tamanho como os cristais de hidróxido de cálcio e etringita, devido ao maior espaço livre nesta área. Sabe-se que o hidróxido de cálcio (CH) é um composto relativamente grande, se comparado aos demais produtos formados pela hidratação do cimento.

Segundo Mehta & Monteiro (1994), os cristais de CH têm um tamanho que varia de 1 à 10µm. Assim, quanto mais espaço houver na pasta (poros), mais CH irá se desenvolver. Sendo o CH e a etringita sólidos com uma resistência relativamente baixa em comparação com o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), e considerando a maior porosidade da zona de transição, a interface pasta/agregado torna-se um local preferencial para a formação de fissuras devido ao acúmulo de tensões. Segundo Isaia (2001 [a]), estas tensões são transferidas de grão a grão e aumentam de tamanho com o passar do tempo, seja por aumento de carga ou variações das condições termo-higrométricas (retração).

Basheer *et al.* (1994) citam os fatores que influenciam a durabilidade de uma estrutura de concreto:

- (i) Água, relação água/materiais cimentícios;
- (ii) Cura;
- (iii) Camada de cobertura;
- (iv) Teor de cimento e suas propriedades;
- (v) Agregado;
- (vi) Dosagem;
- (vii) Trabalhabilidade;
- (viii) Adições;
- (ix) Incompatibilidade dos constituintes do concreto;
- (x) Zona de transição entre pasta e agregado;
- (xi) Interação com o ambiente.

Para os mesmos autores, os fatores acima citados, juntos ou isoladamente, controlam a suscetibilidade dos mecanismos de degradação do material. É evidente que, com exceção da camada de cobertura, todos os outros fatores influenciam na estrutura dos poros do concreto, que está intimamente ligada aos processos de transporte de fluidos através dos mesmos.

## 1.2 Ensaaios laboratoriais X Estrutura real

Em pesquisas laboratoriais, com a utilização de corpos-de-prova moldados, considera-se de modo conjunto a porosidade da pasta e da interface na determinação das variáveis ligadas à microestrutura e/ou durabilidade. No entanto, se considerarmos uma estrutura real, percebe-se que há diferenças significativas com a prática de laboratório. Em uma estrutura corrente, as peças de concreto apresentam volume, forma e dimensões diversas, além do que estão expostas ao tempo.

Kaszyn'ska (2002) ressalta que em uma estrutura de grande volume, o concreto hidrata-se em condições diferentes daquelas observadas em corpos-de-prova, moldados para observar e controlar suas propriedades em laboratório. Em uma análise mais específica de uma estrutura real, pode-se deter na análise da interface forma/concreto e suas diferenças em relação ao interior da peça.

A interface forma/concreto, de maneira análoga à interface pasta/agregado, também apresenta o efeito parede, tornando esta zona mais porosa (Isaia, 2001 [a]). É claro que as escalas são diferentes, visto que no caso da zona de transição, a espessura é de alguns micrômetros e na interface forma/concreto, alguns milímetros. Esta pequena faixa de concreto, a partir da superfície da peça, apresenta, portanto, características distintas do seu interior. Devido ao acúmulo de água, exposição ao sol e vento, esta região torna-se mais porosa e suscetível à percolação e troca de fluidos em ambos os sentidos. Basta isso para perceber-se que o comportamento de uma peça estrutural real é distinto ao de um concreto moldado em corpos-de-prova em laboratório. O desenvolvimento da resistência, da microestrutura e da estrutura dos poros em ambos os concretos ocorre de maneira diferente.

Esta camada superficial de concreto em estruturas correntes é a camada de cobertura da armadura, ou seja, a primeira barreira física a proteger o aço e o próprio concreto do interior da peça, cuja resistência

mecânica adequada é exigida pelas solicitações estruturais, dos agentes agressivos externos. Yuasa *et al.* (1999) afirma que, por razões práticas, a desforma do concreto é realizada muito cedo, quando as reações de hidratação das primeiras idades do cimento ainda estão acontecendo. Por causa do início do processo de secagem iniciado na superfície do concreto, pode haver escassez de água para a hidratação nas regiões próximas da superfície. Assim, segundo estes autores, a superfície do concreto é mais propensa a apresentar um teor de umidade reduzido e uma estrutura de poros mais aberta do que o interior do concreto.

A longo prazo, a durabilidade e proteção da armadura de aço contra a corrosão dependem de uma camada de cobertura mais compacta e com menor impermeabilidade possível (Suryavanshi & Swamy, 1997).

Constata-se, conforme o exposto acima, que esta camada, que deveria apresentar maior compacidade, apresenta maior teor de vazios em sua microestrutura, que podem comprometer a durabilidade, em maior ou menor grau, dependendo da agressividade do ambiente onde está inserida.

Em uma estrutura real o concreto está exposto a diversos fatores que influenciam o desenvolvimento de suas características, desde a mistura dos materiais até a cura e posterior desmoldagem das peças. Possíveis falhas no cálculo dos traços e determinação da espessura da camada de cobertura, na fase de projetos, até uma execução ou cura inadequada são determinantes no desempenho e vida útil de uma estrutura. Condições ambientais severas durante os processos de execução e cura do concreto de uma estrutura também diferenciam de modo nítido o concreto de corpos-de-prova moldados em condições controladas em laboratório do concreto de obras correntes (Mehta & Burrows, 2001 *apud* Isaia, 2001 [a]).

Yuasa *et al.* (1999) afirmam que o teor de umidade de uma peça de concreto é diretamente influenciado pela umidade relativa do ambiente.

Segundo Parrot (2000), o desempenho a longo prazo da camada de cobertura depende das reações do cimento e do desenvolvimento da microestrutura no período pós-cura, quando o concreto é exposto às condições ambientais. As reações de hidratação do cimento ocorrem principalmente nas semanas iniciais da exposição, quando a camada de cobertura do concreto ainda está um pouco úmida e depende da umidade relativa do ambiente a que está exposto, temperatura de exposição e do tipo e reatividade do cimento utilizado.

Collepari (2000) *apud* Isaia (2001 [a]) acrescenta que a inerente vulnerabilidade do sistema aço-concreto observadas nas estruturas reais e não levadas em conta em laboratório, são devidas às variações volumétricas de origem térmica ou retração que possibilitam o aparecimento das fissuras.

Observa-se ainda que, pelo fato de estar exposta ao sol e vento, assim como outras variações do microclima, a camada mais superficial do concreto é mais suscetível a variações volumétricas ocasionadas pela evaporação da água e trocas de umidade (retração hidráulica) e energia (retração térmica) na zona concreto/ambiente. Essas variações podem provocar fissuras que se tornam um caminho fácil para agentes agressivos penetrarem no concreto. Essas variações do microclima levam à dedução de que a camada de cobertura do concreto deveria, portanto, apresentar os mais altos níveis possíveis de estabilidade dimensional, resistência e compacidade, para fornecer a devida proteção à peça estrutural (Isaia, 2001 [a]).

Conclui-se, portanto, que muitos problemas ligados à falta de durabilidade das estruturas de concreto são originados da falta de integração entre realidade virtual (*laboratório*) e realidade real (*obra*), em especial com respeito aos modelos para predição da vida útil de uma estrutura (Isaia, 2001 [a]). A consideração das diferenças microestruturais do concreto da camada de cobertura e do interior das peças não é prática corrente nos ensaios de laboratório que determinam as características

físicas médias do material, o que acarreta em resultados que não são, em sua totalidade, representativos do comportamento estrutural deste concreto, como um todo, em obra.

### 1.3 Importância da Camada de Cobrimento

Sabe-se que a armadura, é revestida com uma camada de passivação, que protege o aço da corrosão. Esta camada é definida por Andrade Perdrix (1992) como uma capa de óxidos transparentes, compacta e contínua que mantém o aço protegido por períodos indefinidos, mesmo em presença de umidades elevadas no concreto. Quando esta película é rompida (despassivação), a armadura está sujeita à corrosão, e para que esta ocorra, é necessário que este filme de passivação seja destruído e que exista uma diferença de potencial interna no sistema aço/concreto.

Basheer *et al.* (1994) destaca que há quatro pré requisitos para que se inicie um processo de corrosão: um ânodo, um cátodo, um condutor (o aço, que permite a transferência de elétrons do ânodo para o cátodo) e um eletrólito (a própria umidade do concreto que permite o movimento de íons entre o cátodo e o ânodo). A transformação do metal em hidróxido metálico é acompanhada por um aumento de volume e a pressão exercida neste processo pode exceder a resistência do mais forte dos concretos, segundo estes autores. Como resultado o concreto fissura, e, se o processo de corrosão da armadura continuar, a camada de cobertura do concreto pode se destacar da peça.

Ilustrando esta situação, na Figura 2, Neville (1997) classifica três situações de danos à camada de cobertura causados pela corrosão da armadura e conseqüente aumento de volume do aço, a saber: *fissuração*, quando surgem fissuras longitudinais nas posições das barras; *lascamento*, quando pedaços de concreto da camada de cobertura se destacam da estrutura, deixando as barras à mostra; *delaminação*,

quando ocorre o destacamento de uma placa correspondente à camada de cobertura, deixando a armadura exposta.

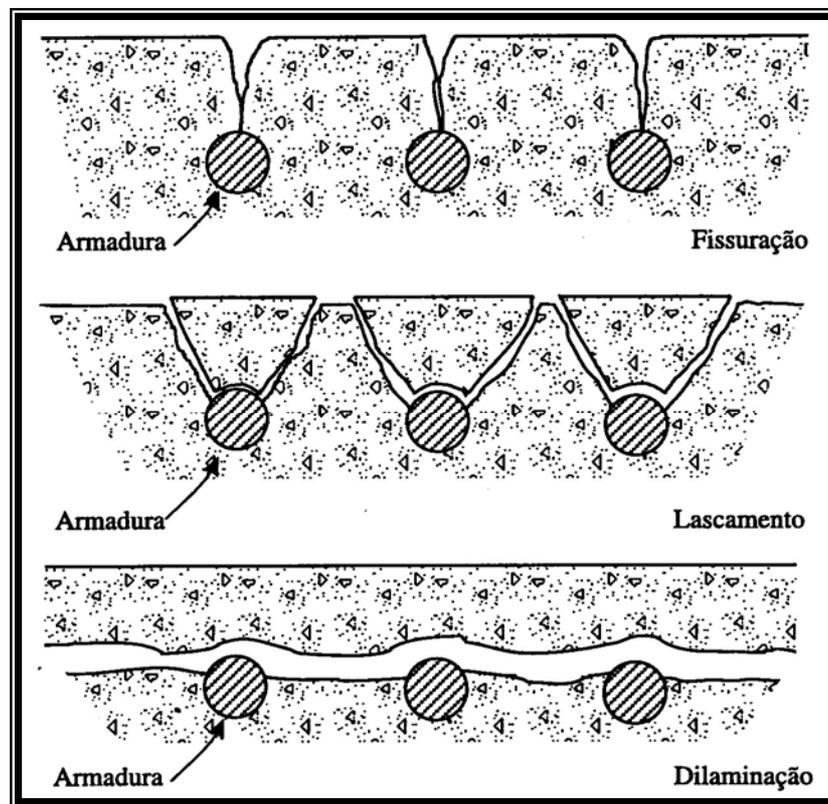


FIGURA 2: Três tipos de manifestação de patologias na camada de cobertura causadas pela corrosão da armadura (Neville, 1997).

Segundo Andrade & Dal Molin (1999), a corrosão da armadura é o dano mais prejudicial que pode ocorrer em estruturas de concreto armado.

Existem atualmente métodos bastante eficazes no que diz respeito à proteção da armadura contra a corrosão, como pinturas epóxi, proteção catódica ou o “black steel”. Porém, esses métodos são caros e estão longe da realidade cotidiana da grande maioria das obras civis. Em obras correntes, a única barreira física que protege a armadura ainda é a camada de cobertura do concreto.

A durabilidade de estruturas de concreto depende, em grande parte, da qualidade da cobertura do concreto (Long *et al.*, 1995). Tal

camada, prevista nos projetos estruturais, tem espessura e microestrutura variáveis. De acordo com Andrade Perdrix (1992), fatores como relação recobrimento/diâmetro da armadura e qualidade da cobertura têm resultados decisivos no que diz respeito à durabilidade de uma estrutura.

#### **1.4 Importância do Nível de Resistência no Cobrimento**

O concreto proporciona a Engenheiros e Arquitetos a moldagem de peças, estruturais ou não, com grande liberdade de formas, esbeltez e com boas condições de resistência. O concreto de alta resistência (CAR) possibilita vencer grandes vãos, com economia na seção das peças e na armadura. Em geral, o nível de resistência à compressão do concreto é proporcional às demais variáveis ligadas à durabilidade. Porém, as necessidades arquitetônicas, estruturais e ambientais com as quais os profissionais da construção civil se deparam, exigiu o desenvolvimento do Concreto de Alto Desempenho (CAD).

Aïtcin (1997) afirma que o CAD é um material obtido através de uma cuidadosa seleção e proporcionamento de seus constituintes, de modo que o concreto é elaborado com os mesmos ingredientes básicos mas tem uma microestrutura diferente do concreto convencional. Entende-se por CAD o concreto que apresenta, prioritariamente, um bom desempenho em relação à durabilidade da estrutura. No CAD são previstas não só as exigências da estrutura quanto à resistência à compressão, mas também no que diz respeito à resistência à carbonatação, permeabilidade à água, cloretos e oxigênio, maior rigidez e estabilidade dimensional, baixa mobilidade de íons cloreto, resistência ao ataque de sulfatos, entre outros fatores.

Segundo Isaia (1995), estas são propriedades decorrentes da diminuição da porosidade através de um concreto adequadamente dosado.

Queiroga (2000) corrobora esta posição, afirmando que um concreto menos poroso, com uma microestrutura mais densa, além das vantagens proporcionadas pelas altas resistências, proporciona um expressivo aumento da vida útil das edificações. Essa preocupação visa proteger a estrutura como um todo, garantindo sua perfeita estabilidade durante a vida útil.

A execução do CAD envolve controle de dosagem, bem como da granulometria dos agregados, teores adequados de aditivos superplastificantes e pozolanas. Para Aïtcin (1997), o concreto envolve uma tecnologia muito simples e uma ciência muito complexa.

Atualmente, mesmo com as vantagens econômicas da substituição de parte do cimento por pozolanas, tais fatores encarecem de maneira significativa uma estrutura de CAD. Porém, o concreto convencional, realizado na grande maioria das obras correntes da construção civil, com resistências não muito altas e, geralmente, sem grandes exigências quanto à durabilidade, não necessita de um controle tão rígido. Cabe observar que, no Brasil, o concreto dosado em central, com o devido controle de dosagem e mistura dos materiais, representa apenas 22% do mercado total de concretagem (Gouveia & Papa, 2004).

Segundo Aïtcin (1997), o CAD pode ser definido como um concreto projetado de modo que uma ou mais características do material são otimizadas através da seleção e dosagem criteriosa de seus constituintes. Para Bharatkumar (2001), a principal diferença entre o concreto convencional e o CAD é o uso de adições químicas e minerais neste último.

Queiroga (2000) detalha algumas particularidades do CAD que o diferenciam do concreto convencional, quais sejam:

- i) reduzido fator água/cimento empregado na mistura do CAD;
- ii) microestrutura mais densa e com menos poros capilares: enquanto que nos concretos convencionais a porosidade fica

em torno de 25 à 30% do volume do concreto, no CAD a porosidade é de aproximadamente 5%;

- iii) modo frágil de ruptura: o CAD apresenta reduzida ductibilidade na ruptura;
- iv) elevado consumo de cimento: o ACI 363, de 1992, prescreve que os teores de cimento comum nos concretos de alta resistência variam de  $400 \text{ kg/m}^3$  à  $600 \text{ kg/m}^3$ ;
- v) diferenças quanto às características mecânicas, como ruptura frágil, resistência à compressão, deformação última, módulo de deformação longitudinal, tração, etc.

À medida que aumenta a resistência à compressão, diminui a dimensão dos poros do concreto como um todo, logo, também, da camada de cobertura.

### **1.5 Microestrutura da camada de cobertura**

Sabe-se que no concreto a fase sólida é constituída pelos agregados e pela pasta de cimento, sendo que a parte sólida da pasta é formada principalmente pelo silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio (CH), sulfoaluminatos de cálcio e pelos grãos de clínquer não hidratados. Considerando-se que os agregados são impermeáveis, a porosidade do concreto restringe-se à pasta e na interface entre a pasta e os agregados, a chamada zona de transição, variando numa faixa bastante extensa de diâmetros de poros, entre algumas dezenas de ângstrons a vários micra (Sato, 1998).

Fu *et al.* (2002) destacam que o volume total de poros na pasta de cimento endurecida diminui gradualmente à medida em que o cimento hidrata-se, mas há poros de vários tamanhos em qualquer idade de hidratação, como poros esféricos, poros capilares, microporos e poros de gel. No entanto, quando referem-se à porosidade *da pasta*, não está se

considerando a porosidade da *interface pasta/agregado*, a zona de transição, observada em argamassas e no concreto.

As propriedades do material e a penetração de fluidos no concreto, provenientes do ambiente onde a estrutura está inserida, têm grande influência na durabilidade da estrutura. Quase todos os mecanismos de deterioração dependem da estrutura dos poros do concreto, considerando-se o tamanho e a distribuição destes poros (Basheer *et al.*, 1994).

Para Andrade Perdrix (1992), a quantificação da porosidade de um concreto fornece indicações da qualidade desse concreto e pode ser considerado um indicador de permeabilidade.

Segundo Campiteli (1987), os fatores que têm influência direta no desenvolvimento de poros no concreto são: água da mistura, porosidade dos agregados, alterações na zona de contato entre a pasta e os agregados (zona de transição), fissuração e deficiência da produção dos concretos.

De acordo com Isaia (2001 [a]), os poros capilares são os que têm maior influência nos processos de transporte de líquidos e gases no interior do concreto. Os poros do gel, espaços vazios entre os produtos da hidratação e entre grãos de cimento não hidratados, por sua vez, sendo de menor dimensão, apresentam maior interação entre as suas paredes e a fase líquida, porque atuam a pequenas distâncias da sua superfície, devido às atrações eletrostáticas decorrentes dos fenômenos de contato (forças de Van der Waals – tensão superficial). Desta forma, os processos de transporte através dos poros menores fica praticamente impedido pelos efeitos eletrostáticos superficiais.

Um dos benefícios advindos da redução das dimensões dos poros no concreto é um acréscimo na resistência, conseqüência da diminuição dos seus diâmetros. A distribuição dos poros e a permeabilidade do concreto são duas propriedades fundamentais para o desencadeamento bem como influenciam diretamente na extensão da deterioração do

concreto (Bassheer *et al.*, 1994). Segundo Aïtcin (2000), a resistência da pasta de cimento hidratada depende da sua porosidade, pois um grande número de poros grandes ou vazios (com diâmetros maiores que 50 µm) reduz a resistência do sistema.

Como a resistência da pasta hidratada de cimento Portland é derivada principalmente das forças de Van der Waals, segue-se que quanto mais compactos (isto é, livres de poros grandes) e menos cristalinos forem os produtos da hidratação, maior será a resistência.” (Aïtcin, 2000, p. 99).

Baseando-se em pesquisas recentes, que estudam a microestrutura do concreto e estrutura dos poros deste material, bem como o desenvolvimento de suas propriedades mecânicas e químicas ao longo do tempo, não é exagero considerar-se o concreto como um material vivo (Mehta & Monteiro, 1994; Basheer *et al.*, 1994), no sentido de que suas características evoluem ou se degradam com o passar dos anos. Este desenvolvimento está intimamente ligado às condições ambientais à que a estrutura está exposta. De acordo com Basheer (1994), a durabilidade das estruturas de concreto não é uma propriedade estática, mas depende das mudanças que ocorrem em sua microestrutura ao longo de sua vida útil.

Este comportamento complexo foi relatado pelo *Comite Euro-International Du Beton* (CEB, 1997), conforme listado abaixo:

- a) a matriz cimentícia apresenta porosidade aberta, ou seja, sistema interconectado de poros que possibilita o transporte de líquidos, gases e íons através de todo o volume da pasta;
- b) a dimensão dos poros do concreto podem variar de aproximadamente 7 ordens de grandezas, de  $10^{-10}$  m (0,1 nm) até  $10^{-3}$  m (1 mm). O transporte, os mecanismos de adesão física e propriedades dos fluidos podem variar

substancialmente de acordo com a dimensão dos poros, especialmente com os de menor dimensão;

- c) os mecanismos de transporte e a velocidade com que ocorrem dependem fundamentalmente das condições micro-ambientais da superfície do concreto (= condições da interface concreto-ambiente, ou seja, concentração e variação no espaço e no tempo de água, gases, íons, sais, etc.).

O CEB (1989) afirma ainda que, devido à complexa natureza dos efeitos ambientais sobre uma estrutura e sua correspondente resposta, acredita-se que um real aperfeiçoamento do desempenho da estrutura não pode ser realizado pelo aperfeiçoamento isolado das características de seus materiais, mas deve considerar os elementos e características dos projetos arquitetônicos e estruturais, processos de execução e procedimentos de inspeção e manutenção, incluindo-se aí a manutenção preventiva. Reitera-se desta forma a importância do ambiente no desenvolvimento da microestrutura do concreto, em especial da porosidade.

Como a camada de cobertura é a primeira barreira física da estrutura de concreto, a permeabilidade desta camada e sua variação durante o tempo e profundidade de fissuração são determinantes para uma estimativa da durabilidade e vida útil de uma estrutura. De acordo com McCarter *et al.* (2000), a camada de cobertura do concreto varia entre um estado de saturação e semi-saturação, como resultado dos movimentos iônicos e de água devido à uma combinação de absorção capilar e difusão. O teor de umidade da camada de cobertura determina o processo predominante de transporte de massas, o qual depende das condições climáticas do ambiente onde a estrutura está inserida.

Segundo Mehta & Monteiro (1994), supõe-se que, quando a armadura de uma peça estrutural está protegida do ar por uma camada adequadamente espessa de concreto de baixa permeabilidade, a

corrosão do aço e outros problemas associados à ela não venham a surgir.

Em especial, deve-se considerar a interconectividade dos poros da camada de cobertura, ou porosidade aberta, no que diz respeito à proteção da armadura da peça. Têm-se aí variáveis que são dependentes das características e do tempo em que esta peça ficou em cura úmida, tanto no período em que as peças estão cobertas pelas formas, quanto após a desmoldagem. A variação destes elementos influencia nas diferenças entre o interior e a parte mais superficial do concreto. Parrot (2000) cita um documento de junho de 1997 do CEB que preconiza o tempo mínimo de cura para a camada de cobertura do concreto para temperaturas entre 15° e 25° C como sendo de 1, 2, 3 e 5 dias para concretos com desenvolvimento de resistência rápido, médio, lento e muito lento, respectivamente. Este autor afirma ainda que incrementos no período de cura acima de 3 dias promovem uma redução significativa na porosidade.

Para Ollivier (1998) *apud* Isaia (2001 [a]), a camada próxima à forma influencia na distribuição de partículas sólidas e de água, permanecendo com mistura mais rica em cimento, embora com menor teor de compostos hidratados devido à maior porosidade e menor teor de umidade

Um dos primeiros pesquisadores a estudar a camada de cobertura do concreto foi Kreijger (1984, *apud* Isaia, 2001 [a]), realizando o corte de porções de concreto com 2 mm de espessura, entre a superfície até 50 mm de profundidade, estudando a composição do tamanho das partículas e sua distribuição espacial. Entre 0 e 1 mm foi detectada a presença apenas de cimento, entre 1 e 4 mm de argamassa e, após 30 mm de profundidade, de concreto. Estas diferenças são devidas ao efeito parede, sedimentação, segregação, método de compactação e os processos de evaporação e absorção de água em ambos os sentidos. Com isso, ocorrem variações na relação água/materiais cimentícios, no teor de

agregados e na porosidade do concreto da camada superficial. Por essas razões, fica claro que a cobertura da armadura desempenha papel determinante para o bom desempenho estrutural de uma peça de concreto, bem como de seu desempenho frente à agentes agressivos e vida útil.

Algumas normas correntes para projeto de estruturas de concreto dão ênfase para a *espessura* da camada de cobertura, sem que haja a devida preocupação quanto à *qualidade* do concreto desta camada. Porém, a espessura da camada de proteção da armadura não é um fator isolado. Cabe salientar que a nova norma brasileira para concreto, NBR 6118/2003, em seu *item 7.4.1* diz que a durabilidade de uma estrutura depende das características do concreto e da espessura e qualidade do concreto da cobertura da armadura.

De acordo com o nível de agressividade do ambiente onde está a estrutura, a norma especifica espessuras e relações água/cimento a serem seguidas (tabelas 6.1, 7.1 e 7.2 da NBR 6118/2003). O *item 7.4.3* diz que os requisitos das tabelas correspondentes à espessura e relação água/cimento da cobertura só são válidos para concretos executados com cimento Portland que esteja de acordo com as especificações das normas correspondentes, com consumos mínimos de cimento ( $\text{kg/m}^3$  de concreto) de acordo com a NBR 12655. Porém, não há especificações na norma que garantam um controle da qualidade do concreto da cobertura, ou mesmo que pressuponham adições de pozolanas em diferentes teores daqueles já incorporadas aos cimentos comerciais.

As espessuras preconizadas pela norma para o cobrimento do concreto de acordo com a agressividade do ambiente variam de 20 à 55 mm (tabela 7.2 da NBR 6118/2003), por exemplo: para lajes em ambientes de agressividade fraca, a norma preconiza uma camada de cobertura de 20 mm e para peças de concreto protendido em ambientes de agressividade muito forte, a espessura preconizada é de 55 mm. Sabe-se, no entanto, que o concreto da camada de cobertura apresenta

microestrutura diversa do concreto do interior da peças e a simples adoção de espessuras ou relações *água/materiais cimentícios* (*a/mc*) dentro dos limites da norma podem não ser suficientes para garantir a durabilidade necessária de uma estrutura. Poderia ser proposto um teor de adições pozolânicas além daqueles já incorporados ao cimento comercial, para cada situação, com o intuito de melhorar as características microestruturais do concreto na camada de cobertura.

Para Aïtcin (2000), a importância da camada de cobertura sobre a durabilidade das estruturas como um todo, somente foi evidenciada nos últimos anos. Atualmente, as exigências estruturais e técnicas na execução de edifícios de grande altura, como o bombeamento e lançamento do concreto nos pavimentos mais altos ou à longas distâncias, induziu a utilização de concretos de trabalhabilidades com abatimentos entre 100 mm e 200 mm. Com isso, pode haver segregação, aumento da concentração da pasta e seus inconvenientes, como as variações volumétricas por retração, aumentando a permeabilidade e porosidade do concreto mais superficial de um elemento estrutural. No entanto, Giovannetti (1999) afirma que é possível fluidificar o concreto de modo a obter-se abatimentos de até 250 mm sem alterar suas características de resistência e de homogeneidade, desde que haja o devido proporcionamento dos agregados, para evitar segregação.

Gebauer & Torrent (1989, *apud* Isaia, 2001 [a]), ao estudarem o efeito da cura sobre a resistência à compressão e carbonatação concluíram que o desempenho destas propriedades são dependentes do cobrimento do concreto, e dever-se-ia devotar mais atenção para o estudo da qualidade desta porção superficial para melhor entender sua microestrutura e porosidade com o propósito de desenvolver novos métodos para especificar e controlar sua qualidade *in situ*.

Em outro experimento Torrent & Jornet (1991, *apud* Isaia, 2001 [a]) avaliaram a qualidade da camada de cobertura em função do nível da

resistência do concreto, tipo de cimento, da permeabilidade ao oxigênio e absorção de água, e obtiveram as seguintes conclusões:

- a) a permeabilidade ao oxigênio da superfície do concreto decresceu 40 vezes quando a resistência aumentou de 25 para 85 MPa;
- b) para o mesmo acréscimo de resistência a taxa de absorção de água decresceu 4 vezes;
- c) a influência do cimento, inclusive aqueles com adições, não apresentou significância na permeabilidade ao O<sub>2</sub>;
- d) parece que a especificação de um nível mínimo de resistência, ao invés de relação máxima de  $a/mc$  seja mais conveniente para assegurar desejado nível de impermeabilidade;

Yuasa *et al.* (1999) estudaram a estrutura dos poros e distribuição de umidade na camada superficial do concreto, com as seguintes conclusões:

- a) o decréscimo de umidade iniciou no paramento externo do concreto estendendo-se até 50 mm de profundidade na idade de 28 dias;
- b) a água combinada junto à superfície foi menor do que a do interior, tornando-se mais significativa este decréscimo para as relações  $a/mc$  menores;
- c) o processo de secagem ocasionou aumento do tamanho dos poros maiores que 18 – 32 nm e um acréscimo no volume total de poros, quanto mais próximo da superfície. Esta tendência foi mais notada para as relações  $a/mc$  mais altas.

Em continuidade ao experimento acima citado, Yuasa *et al.* (2000) estudaram a variação da resistência à compressão e porosidade de pastas de cimento a partir da superfície em direção ao interior de corpos de prova moldados. Em geral, foi constatado que a qualidade do concreto

da cobertura tende a ser *menor* que a do concreto do interior da peça, em especial no que diz respeito à resistência à compressão e durabilidade.

Os resultados obtidos pelos autores mostraram as seguintes evidências:

- a) houve correlação linear entre o logaritmo da resistência à compressão e o volume total de poros, para cada relação a/mc estudada;
- b) Quanto menor a distância à superfície do concreto, maior o volume total de poros. Esta tendência é maior para concretos com relação a/ag mais altas e concretos mal curados;
- c) as resistências junto à superfície foram menores, em concordância com o aumento da porosidade total. A diferença de resistências entre a superfície e o interior do concreto foi de aproximadamente 20 MPa;
- d) a influência do decréscimo da resistência se estendeu até 5 cm de profundidade para as relações a/c de 0,4 e 0,6 e até 10 cm para 0,8.

Na Figura 3, a seguir, pode-se observar a distribuição dos poros a partir da superfície segundo Yuasa (2000).

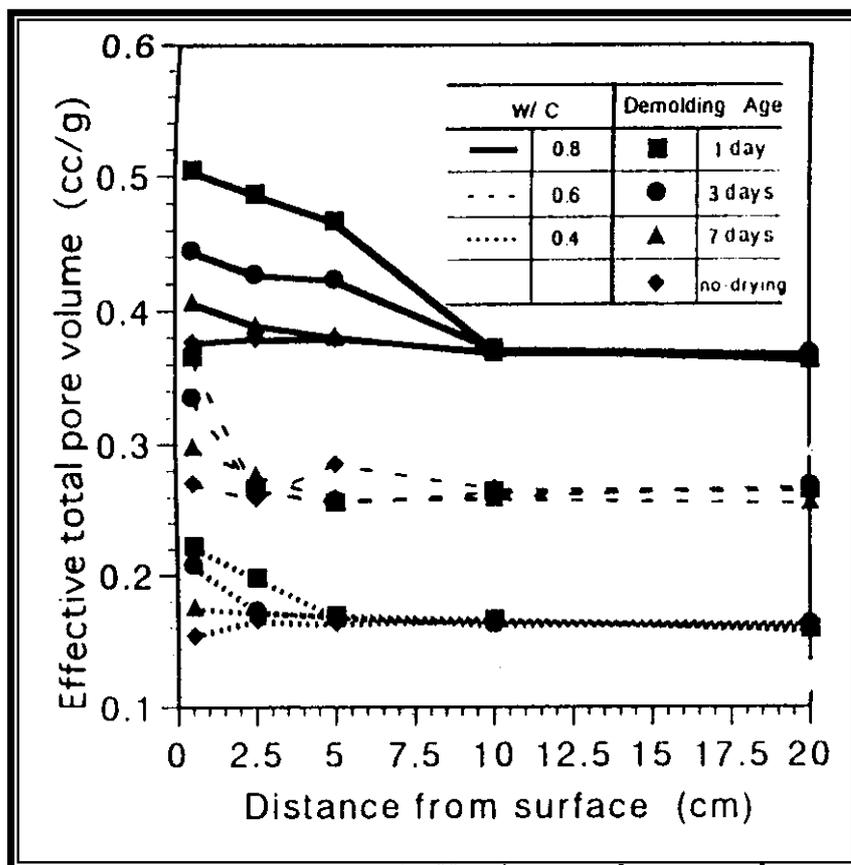


FIGURA 3: Distribuição dos poros a partir da superfície segundo Yuasa (2000).

Os autores afirmam ainda, que por causa do processo de secagem iniciado na superfície do concreto, resultou uma falta de água necessária para a hidratação do concreto próximo da superfície. Como resultado, parte da superfície do concreto é mais propensa a apresentar uma estrutura de poros mais grosseira do que no concreto do interior das peças.

Isaia (2001 [a]) ressalta a importância da porosidade e distribuição do tamanho dos poros, a partir da superfície, na camada de cobertura do concreto sobre as variáveis ambientais e intrínsecas que governam a sua durabilidade.

Os dados e afirmações já expostas revelam que a camada de cobertura da armadura constitui uma microestrutura diferenciada do restante da pasta cimentícia e que, esta porção de concreto em estruturas

reais, apresentam características de desempenho diferentes dos corpos de prova moldados em laboratório, devido a diferentes condições de cura e de relação área de forma/volume de concreto. A introdução de adições minerais no concreto torna sua microestrutura mais densa e impermeável, dificultando o transporte de substâncias agressivas através dos canais capilares, trazendo estes benefícios à camada de cobertura.

Para melhorar qualidade do cobrimento da armadura, têm-se desenvolvido uma série de técnicas construtivas com o intuito de aumentar a qualidade desta camada, como o uso de geotêxteis como membranas envolventes às formas com o objetivo de drenar o excesso de água que se acumula na interface concreto/forma, uso de concretos modificados e aplicação de tratamentos químicos na superfície do concreto (Long *et al.*, 1995). Com isso há uma redução da relação  $a/mc$  na superfície, e conseqüente aumento da resistência do cobrimento. Tais técnicas são válidas, porém ainda não são de uso corrente devido, principalmente, a seus custos. Cabe salientar que tais técnicas melhoram as características apenas da camada de cobertura, enquanto que as adições pozolânicas, devidamente, dosadas melhoram a qualidade do concreto estrutural como um todo.

## **1.6 Concretos com altos teores de cinza volante**

Pesquisas sobre a substituição do cimento por altos teores de pozolanas ocorrem simultaneamente em todo o mundo, o que mostra uma preocupação crescente com a durabilidade das estruturas de concreto e com a sustentabilidade na construção civil. A substituição do clínquer, um produto nobre e relativamente caro, por um subproduto como, por exemplo, a cinza volante, traz muitas vantagens econômicas e ecológicas, tanto para a indústria como para a população em geral.

Sabe-se que as adições minerais, especialmente as pozolanas, atuam na microestrutura da pasta e na interface pasta/agregado através

da formação de compostos hidratados secundários que refinam os poros e o tamanho dos grãos, por efeito químico e, ainda, pela obstrução e densificação das partículas finas, por efeito físico (Isaia *et al.*, 2003). Por isso, a microestrutura se torna mais fina e homogênea, aumentando a compacidade, resistência e durabilidade da pasta cimentícia. Da mesma forma que as adições minerais reduzem a conectividade dos poros da pasta, também atuam na microestrutura da zona de cobertura da armadura, densificando-a e tornando-a mais compacta e menos permeável (Isaia, 2001 [a] ).

Estudos sobre concreto estrutural apontam a substituição crescente de cimento Portland por cinza volante em níveis iguais ou superiores a 50% (Sivasundaram, 1993; Isaia, 1995; Swamy & Darwish, 1997; Hübert, 2001; Bouzoubaâ, 1998 e 2001; Hoppe, 2002; Fu, 2002, entre outros). Estes trabalhos mostram o grande potencial e os benefícios que as adições minerais proporcionam ao concreto quando substituem igual massa de cimento, melhorando a durabilidade do concreto. Cabe salientar, no entanto, que as misturas devem ser devidamente dosadas. Atualmente, a utilização de teores de adições pozolânicas adequados a cada situação é fator imprescindível para a execução de obras cujo desempenho e utilização exijam a utilização de concretos de alto desempenho.

Cabe fazer aqui uma diferenciação entre a reação de uma mistura de cimento Portland e outra de cimento Portland pozolânico. Segundo Mehta & Monteiro (1994), basicamente, a diferença está na velocidade de formação e forma do silicato de cálcio hidratado. No caso do cimento Portland comum, o  $C_3S$  (Alita) reage com a água (H), formando o C-S-H e CH, em uma *reação rápida*; e o  $C_2S$  (Belita) reage com a água, resultando também C-S-H e  $Ca(OH)_2$ , em uma *reação moderada*. Já o cimento Portland pozolânico (cimento Portland + pozolana) ocorre uma reação secundária entre a pozolana, a água e o  $Ca(OH)_2$  remanescente da hidratação do cimento Portland, formando novas fases de C-S-H, no que

é considerada uma *reação lenta*. Dessa forma, equacionando o exposto acima, temos:



Nas reações pozolânicas ocorre uma aceleração da hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  pelas partículas finas das pozolanas, liberando os íons  $\text{Ca}^{+2}$  e, posteriormente, formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) com locais preferenciais de nucleação, fazendo com que este precipite na solução dos poros, segundo Massazza (1998). Deste modo, o hidróxido de cálcio é dissolvido e precipitado, havendo a adsorção dos íons  $\text{Ca}^{+2}$  pelos íons  $\text{Si}^{+4}$  dissolvidos da superfície dos grãos da pozolana, com a conseqüente formação do C-S-  $\text{H}_{\text{secundário}}$ .

Segundo Gastaldini (1996), as adições minerais, através das reações pozolânicas, reduzem a porosidade e a permeabilidade da pasta de acordo com sua reatividade com o hidróxido de cálcio.

De acordo com Mehta & Monteiro (1994), a hidratação do cimento só inicia quando a pressão de vapor nos capilares é suficientemente alta, cerca de 80% da pressão de saturação. Complementando esta afirmação, Tan & Gjorv (1996) afirmam que por esse motivo, a retração hidráulica do concreto pode parar a hidratação do cimento antes de os poros estarem preenchidos pelos produtos da hidratação, e assim uma estrutura de poros mais contínua pode se formar. O concreto da camada de cobertura é mais sensível à retração hidráulica, por ser mais propenso a perder água. A secagem muito rápida também pode causar uma maior fissuração, agravando o processo de deterioração do concreto. Sabe-se também que a cura em altas temperaturas pode causar um baixo grau de hidratação do cimento em idades mais avançadas, causando maior

porosidade da pasta de cimento, baixas resistências e alta permeabilidade.

Sabe-se que a microestrutura da camada de cobertura tem influência determinante na previsão da vida útil de uma estrutura, visto que sua composição, porosidade e teor de hidróxido de cálcio (CH), remanescente da hidratação do cimento, influenciam na resistência, na percolação de líquidos e gases no concreto, bem como no avanço da frente de carbonatação, que pode despassar a armadura.

As pozolanas mais utilizadas, segundo Frizzo (2001), são a sílica ativa, gerada na siderurgia do silício, a escória de alto-forno, sub-produto da fabricação do aço, a cinza volante, resíduo da queima de carvão mineral triturados em termoelétricas e o metacaulim. Estas pozolanas enquadram-se entre as artificiais, ou seja, são produtos secundários de um processo (sub-produtos), potencialmente poluidores do meio ambiente, mas detentoras de estrutura amorfa (vítrea) devido às altas temperaturas em que são geradas.

A *cinza volante* (CV), sub-produto de usinas termoelétricas, possui influência benéfica na diminuição da porosidade e aumento da resistência do concreto a longo prazo, através da reação com o hidróxido de cálcio remanescente da hidratação do cimento e formação de novas fases de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Segundo Bouzoubaâ (1998), a cinza volante em combinação com o cimento melhora significativamente as características do concreto ligadas à resistência.

Para Aïtcin (2000), o uso de cinza volante de boa procedência e qualidade deve ser seriamente considerado para execução de CAD com resistência entre 50 e 75 MPa. Acima deste limite de resistência, o uso desta pozolana deve ser desconsiderado ou efetuado em combinação com a sílica ativa (Aïtcin, 2000).

Kawaguchi *et al.* (1998) acrescentam que a adição de cinza volante ao concreto, em proporções adequadas, melhoram as características do

material quanto à resistência à abrasão, durabilidade em ambiente marinho, congelamento e degelo e calor de hidratação.

Vale ressaltar também que, além das vantagens técnicas acima citadas, já comprovadas por Mehta & Monteiro (1994), tal substituição traz vantagens econômicas; visto que se propõe a substituição de um produto nobre (clínquer), por um sub-produto da indústria; e ecológicas, na medida que utilizamos a cinza volante que de outra forma seria descartada no meio-ambiente. Desta forma, tem-se, segundo Swamy (1986) *apud* Isaia (1995), um menor consumo de energia, maior proteção ambiental e conservação dos recursos naturais; além de aumento da estanqueidade e durabilidade da estrutura, devido ao refinamento dos poros ocorrido.

Deve-se observar, no entanto, que o desenvolvimento de características como a resistência à compressão torna-se mais lenta quando são adicionados ao concreto quantidades consideráveis de cinza volante (Kohno *et al.*, 1998; Bouzoubaâ, 1998). Sabe-se que o C<sub>3</sub>S (silicato tricálcico) é o composto responsável pela resistência do concreto nas idades iniciais. Uchikawa (1986), no entanto, afirma que a cinza volante retarda a hidratação do C<sub>3</sub>S nas idades iniciais e acelera a hidratação deste composto nas idades mais avançadas. Segundo Babu & Rao (1996), a cinza volante demonstra uma eficiência cimentícia muito baixa nas primeiras idades, agindo antes como agregado fino (filler), mas, em idades mais avançadas, o efeito pozolânico se torna mais efetivo, proporcionando um acréscimo considerável no desempenho do concreto, opinião partilhada por Kawaguchi *et al.* (1998).

A eficiência da cinza volante depende de características físicas, como forma, tamanho e distribuição das partículas, bem como de características químicas, como composição e teor de sílica. Schiessl (1991) sugere que a eficiência cimentícia da cinza volante depende não somente da relação água/materiais cimentícios ( $a/mc$ ), mas também depende da quantidade da adição em substituição ao cimento. Para Fu *et*

al. (2002), a reatividade da cinza volante depende da proporção de substâncias vítreas e cristalinas no material. Quanto maior a proporção de matéria vítrea, maior é a reatividade da cinza volante.

Porém, teores elevados de substituição de cimento por pozolanas resultam em menores teores de hidróxido de cálcio no concreto. Com a diminuição do teor de hidróxido de cálcio e conseqüente diminuição do pH do concreto, aumenta a velocidade de carbonatação, fato este que deve ser considerado no dimensionamento de estruturas correntes. Visando a reposição e até um incremento na reserva de CH do concreto, o que pode proporcionar mais formação de C-S-H secundário ao reagir com a pozolana, a adição de cal hidratada ao concreto fresco, em teores de 20% em massa, além de criar uma reserva alcalina suplementar, diminui a permeabilidade e a porosidade aberta em comparação ao concreto sem adições (Hoppe, 2002; Stumpp, 2003).

Uchikawa (1986) afirma que a cinza volante não é hidratada por si só, mas sim pela adição de álcalis e hidróxido de cálcio e quanto maior a quantidade disponível destes compostos, tanto maior será a quantidade de cinza volante hidratada em idades mais avançadas. Portanto, a adição de cal (CH) ao concreto fresco fornece uma grande reserva alcalina, que fica disponível para a hidratação da CV e formação de novas fases de C-S-H.

Sabe-se que a hidratação do cimento libera uma certa quantidade de cal, mas esta contribui pouco para a resistência e pode acarretar problemas de durabilidade, pois é solúvel em água. Segundo Aitcin (2000), esta lixiviação resulta em um aumento da porosidade da pasta. Além disso, a cal gerada pelas reações de hidratação do cimento produz uma zona de transição mais porosa, pois as partículas cristalinas de hidróxido de cálcio da cal têm tamanho maior do que as de silicato de cálcio hidratado. Já o uso da cal hidratada cálcica como adição ao concreto fresco melhora a estrutura da zona de transição, pois a cal adicionada, ao reagir com a sílica amorfa da pozolana, gera fases

secundárias de silicato de cálcio hidratado, redensificando a zona de transição (Hoppe, 2002; Stumpp, 2003).

Outro fator relevante é que a capacidade de retenção de água das argamassas está relacionada com a quantidade de cal hidratada presente na pasta. Guimarães (2002) define como *retenção de água* a capacidade da cal hidratada de conter e reter água que resiste à sucção. Com a adição de cal hidratada ao concreto, obtém-se, portanto, uma maior retenção de água por parte da pasta, criando assim uma reserva interna de umidade no concreto, umidade esta que fica disponível para a hidratação da mistura.

Em muitas pesquisas do GEPECON, como Isaia (1995), Gastaldini (1996), Frizzo (2001), Moraes (2001) e Hoppe (2002) entre outros, foram estudadas as substituições de cimento por cinza volante em altas proporções, até mesmo acima de 50% e, citando Neville (1997), destacam-se, nestes casos, as vantagens na reologia do concreto fresco e sua impermeabilidade e durabilidade quando endurecido.

Um fator que deve ser considerado quando se trabalha com concretos com altos teores de cinza volante em substituição ao cimento é a perda de trabalhabilidade da mistura, devido à maior finura da pozolana. Tal inconveniente é relatado por Bouzoubaâ (1998) e pode ser contornado com o uso de superplastificantes em teores adequados, de acordo com o abatimento previsto em projeto.

É importante lembrar que, embora nesta pesquisa pretenda-se obter, com a cura dos protótipos, uma aproximação das condições *in loco* de obras civis, a adição de altos teores de pozolanas *ainda* não é prática comum em obras.

Comercialmente, encontramos o Cimento Portland Pozolânico, ou seja, o cimento Portland com adições pozolânicas industrializado. Para Calleja (1982), os benefícios advindos do emprego de cimentos pozolânicos em relação ao cimento Portland puro são: maior resistência à compressão e à tração, a longo prazo; maior resistência à reação álcali-

agregado; menor retração; maior resistência ao ataque de águas salinas e ácidas; menor porosidade; menor calor de hidratação; melhor aderência da pasta ao agregado e da argamassa ao aço; menor custo do concreto.

Portanto, no momento em que a adição de CV melhora as características da microestrutura do concreto como um todo, promove também a otimização das características de durabilidade da camada de cobertura. Uma microestrutura mais densa da camada de cobertura pode ser determinante para o aumento da vida útil das estruturas de concreto.

## 1.7 Sustentabilidade

A construção civil é conhecida como grande geradora de desperdício de materiais, detendo índices na faixa de 30% no custo final da obra. O entulho gerado nas obras brasileiras situa-se entre 10 a 20% da massa final do edifício, variando em função do elemento de alvenaria utilizado e do tipo de organização e controle da obra. Portanto, a construção civil, em geral, é grande consumidora de recursos naturais, de energia e emissão de gases (monóxido e dióxido de carbono, principalmente), contribuindo no chamado *efeito estufa*.

A produção de cimento Portland, em particular, gera aproximadamente uma tonelada de dióxido de carbono por tonelada de clínquer produzido (Bouzoubaâ, 1998). Considerando-se a produção mundial de 1,5 bilhões de toneladas/ano, calcula-se que a indústria cimenteira é responsável por aproximadamente 5% da emissão mundial de CO<sub>2</sub> na atmosfera, agravando o efeito estufa (Davidovits, 1994).

Tal enfoque nos remete a um princípio básico do desenvolvimento sustentável: as tecnologias para produção de bens e serviços devem ser inovadoras e eficientes no uso dos recursos. Os recursos naturais devem ser consumidos e administrados visando o menor impacto possível sobre o meio ambiente.

O desenvolvimento sustentável representa a melhor saída para conciliar a produção de riqueza e conforto para a sociedade sem comprometer a sobrevivência do planeta. Este conceito é baseado em três pontos fundamentais: o econômico, o social e o ambiental.

Somente através da implementação dessa norma de conduta, será possível impulsionar a inovação de novas tecnologias e da abertura de novos mercados. O desenvolvimento sustentável fortalece o modelo empresarial atual baseado em um ambiente de competitividade global.

Além disso, o uso de adições minerais no concreto se enquadra no conceito de ecoeficiência, através do qual se pode relacionar a competitividade com o desenvolvimento sustentável, visto que a substituição de cimento por pozolanas reduz o consumo de matéria prima para a fabricação do cimento portland e reduz também o consumo de energia gerado no processo (Isaia, 2003). Para reduzir o impacto ambiental, vários elementos são inseridos no processo produtivo: redução do consumo de matérias-primas; redução do consumo de energia e de dispersão de substâncias tóxicas; maximização do uso sustentável de recursos renováveis.

Para Davidovits (1994), há dois métodos para reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> na produção de cimento:

- 1- Reabsorção do dióxido de carbono da atmosfera durante o processo de carbonatação do concreto;
- 2- Adição de resíduos industriais (cinza volante, escória de alto forno, sílica ativa, cinza de casca de arroz) ao cimento.

Fica claro que a segunda alternativa é a mais coerente e vantajosa, tanto em termos de sustentabilidade, quanto em termos técnicos e econômicos.

Logo, ecoeficiência é o estilo gerencial que busca produzir mais com menos insumos e menos poluição, mantendo preços de produtos e serviços, melhorando a qualidade de vida da sociedade, e

progressivamente levando os impactos ambientais e o uso de recursos a situar-se dentro dos limites da capacidade de sustentação ambiental do planeta.

Os sete princípios básicos da ecoeficiência são:

- Redução na intensidade do uso de matérias primas;
- Redução na intensidade do uso de energia;
- Redução da dispersão de substâncias poluentes no ambiente;
- Intensificação do reaproveitamento e reciclagem de resíduos e subprodutos (intra e entre empresas);
- Maximização do uso sustentável dos recursos naturais renováveis;
- Aumento da vida útil dos produtos;
- Incremento à intensidade de serviços dos produtos.

A cinza volante tem uma produção estimada anual de 600.000.000 t/ano, com cerca de 10% deste total aproveitado na indústria da construção civil (Bilodeau & Malhotra, 2000 *apud* Alves, 2000). Dessa forma, aproveitando esse material na execução de concreto, a indústria da construção civil (re)aproveita mais de 60 milhões de toneladas de cinza que, de outra forma, seria descartada no meio ambiente, causando um impacto considerável no ecossistema.

Em particular, no estado do Rio Grande do Sul, são produzidas em torno de 600.000 ton/ano de cinza volante, sendo que as indústrias cimenteiras locais usam aproximadamente 60% deste total para a fabricação de cimento Portland pozolânico (Vagheti, 1999).

Pesquisas recentes realizadas pelo Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto da UFSM, GEPECON, (Frizzo, 2001; Cervo, 2001; Venquiaruto, 2002; Hoppe, 2002; Stumpp, 2003) atestam os bons resultados do uso cinza volante em concretos. Os resultados mostram, em geral, um refinamento dos poros do concreto e conseqüente diminuição da porosidade total e capilaridade, diminuição na percolação

de líquidos e gases, bem como resistências significativas, em misturas com teores de até 50% de cinza volante em substituição ao cimento. Tais resultados mostram a viabilidade do uso de tal adição mineral ao concreto.

Em suma, a substituição de cimento por pozolanas se enquadra dentro dos princípios da ecoeficiência, pois reduz o consumo de matéria prima para a fabricação do cimento Portland (calcário e argila), diminui o consumo de energia, por ser este o material mais energético, e reduz a poluição pela menor emissão de dióxido de carbono para a atmosfera pelo uso de materiais menos poluentes (Isaia & Gastaldini, 2003).

## **CAPÍTULO II**

### **PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

#### **2.1 Objetivos**

O principal objetivo foi estabelecer as diferenças existentes entre as propriedades do concreto da camada de cobertura e o do interior de peças estruturais e quanto à resistência à compressão, o teor de água combinada, microestrutura e porosidade, comparando concretos de referência e com cinza volante, com e sem a adição de cal hidratada. A influência da adição de cal hidratada sobre a resistência à compressão, estrutura dos poros e teor de água combinada foi analisada.

Em linhas gerais, a questão geradora deste trabalho é: “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 estrutural e a armadura?”

Especificamente, as questões desta investigação são desdobradas nos seguintes itens:

- em termos quantitativos, como variam as principais propriedades da microestrutura das estruturas de concreto, a diversas distâncias, a partir da superfície do concreto, até 60 mm de profundidade?
- Em relação ao concreto de referência somente com cimento Portland, quais são as modificações que se constataam nas misturas com altos teores de pozolanas e com cal, em termos de microestrutura?
- Quais são as diferenças constatadas entre os corpos de prova moldados e os testemunhos extraídos dos protótipos para as variáveis da microestrutura?

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.

A iniciativa de comparar corpos de prova, moldados e curados sob condições controladas e testemunhos extraídos de protótipos cujas dimensões e formas se aproximam de uma estrutura real, procura obter uma correlação para uma maior proximidade entre resultados de pesquisa e obra real. Tenta-se assim, diminuir a distância, já comentada, que existe entre estas duas realidades.

Pode-se ainda justificar o esforço em otimizar o material de construção concreto, citando:

A arquitetura só existe quando o desenho é transformado na realidade concreta dos materiais e das estruturas, obedientes piamente às leis físicas e químicas que regem o seu equilíbrio estático e sua durabilidade (Oliveira, 2002, p. 9).

## 2.2 Variáveis envolvidas

As variáveis envolvidas nesta investigação são:

a) *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; 0,60 e 0,8 para os traços de referência e 0,40; 0,55 e 0,75 para os traços com adição de CV com e sem cal, para os ensaios de resistência à compressão axial, porosidade, teor de água combinada e

MEV;

- idades para ensaios de compressão axial: 28 e 91 dias;
- misturas aglomerantes: referência, (50% de cinza volante + 50% de cimento), (50% de cinza volante + 50% de cimento + 20% de cal);
- profundidade do concreto a partir da superfície.

b) *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.

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

- resistência à compressão axial dos corpos de prova moldados;
- resistência à compressão axial dos testemunhos extraídos;
- distribuição do tamanho dos poros;
- diâmetro crítico dos poros;
- teor de água combinada;
- análise qualitativa por microscopia eletrônica de varredura.

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), com exceção da resistência à compressão que foi realizada em corpos de prova moldados e extraídos.

Os ensaios dos testemunhos extraídos foram integrais, sem nenhum corte. Para os ensaios em pó (água combinada), assim como pedaços de concreto para porosimetria e MEV, as amostras foram retiradas dos espaços entre os furos dos protótipos.

As idades de estudos para a resistência à compressão foram de 28 e 91 dias.

## **2.3 Materiais utilizados**

Os materiais envolvidos nesta pesquisa passaram por análises 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.

### **2.3.1 Materiais Cimentícios**

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

#### **2.3.1.1 Cimento**

Os ensaios de caracterização física e química do cimento 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
- Resistência à compressão da argamassa normal – NBR 7215

Para este estudo, foi utilizado cimento Portland industrializado de alta resistência inicial (ARI) CP V, em conformidade com a EB-NBR 5733, escolhido por fornecer maior teor de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  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.

As características físicas do cimento estão na Tabela 1 e as químicas no Quadro 3.

TABELA 1: 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 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	3,16
Finura Blaine ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	436
Finura # 0,075 mm (%)	0,3
Tempo de início de pega (min.)	144
Tempo de fim de pega (min.)	225

### 2.3.1.2 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  $2,10 \text{ g}/\text{cm}^3$ , e superfície específica de  $361 \text{ m}^2/\text{kg}$  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. Com isso, tem-se uma maior superfície de adsorção. Tal afirmação é corroborada por Wartchow *et al.* (1983), segundo o qual o processo de adsorção é regido por um fenômeno de superfície, na qual uma substância é extraída de uma fase e concentrada na superfície de outra. Esse fenômeno resulta de forças ativas dentro de fases limites ou nas proximidades da superfície.

Dhir (1986), *apud* Isaia (1995), afirma que a finura da cinza volante é o fator isolado mais importante para a determinação da qualidade desta cinza e Jawed *et al.*, (1991) retoma esta posição ao ressaltar a importância da finura da cinza volante, priorizando-a sobre a sua composição química em relação à sua atividade.

#### 2.3.1.3 Cal

Para a cal hidratada 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>.

A composição química dos aglomerantes e da cal hidratada estão apresentados no Quadro 2.

QUADRO 2: Composição Química dos materiais.

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	

### 2.3.2 Agregados

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

- Composição granulométrica – NBR 7217
- Massa específica do agregado miúdo – NBR 9776
- Massa específica do agregado graúdo – NBR 9937
- 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

#### 2.3.2.1. Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia natural de origem quartzosa, proveniente do município de Santa Maria/RS foi peneirada na peneira 4,8 mm, seca em estufa e armazenada em caixas de madeira com tampa. A areia utilizada foi classificada como pertencente à zona 3, de acordo com

a distribuição dos grãos dentro dos limites da NBR 7211. As características da areia são apresentadas no Quadro 3.

### 2.3.2.2. 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. Este agregado procede do município de Itaara, RS.

QUADRO 3 – 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	6,76	1,87
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

### 2.3.3. Aditivo Químico

O *slump* especificado foi 100 mm  $\pm$  20 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.

A quantidade de material por metro cúbico de concreto está apresentada na Tabela 2, no final do capítulo.

## 2.4 Dosagem

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).

O teor de argamassa para o concreto de referência com a/mc = 0,45 foi de 52% em massa e para os demais (a/mc de 0,60 e 0,80 para o traço de referência e 0,40, 0,55 e 0,75 para os traços com cinza volante com e sem cal) foi feito o ajuste em volume, em função da substituição do cimento pela cinza volante. Segundo Mehta & Monteiro (1994, p. 323) o

cálculo do volume de argamassa em volume é o mais exato. A variação do volume de argamassa ocorreu de modo a proporcionar a trabalhabilidade adequada ao concreto fresco, dada a variação admitida do abatimento.

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.

#### 2.4.1 Nomenclatura utilizada

Adotou-se a seguinte nomenclatura para os traços:

- *Traços de referência:*

<b>NOME</b>	<b>a/mc</b>	<b>CORPO DE PROVA</b>
<b>R45</b>	0,45	Moldados
<b>R45 ext</b>	0,45	Extraídos
<b>R60</b>	0,60	Moldados
<b>R60 ext</b>	0,60	Extraídos
<b>R80</b>	0,80	Moldados
<b>R80 ext</b>	0,80	Extraídos

- Traços com 50% de CV e 50% de cimento Portland (em massa):

<b>NOME</b>	<b>a/mc</b>	<b>CORPO DE PROVA</b>
<b>CV40</b>	0,40	Moldados
<b>CV40 ext</b>	0,40	Extraídos
<b>CV55</b>	0,55	Moldados
<b>CV55 ext</b>	0,55	Extraídos
<b>CV75</b>	0,75	Moldados
<b>CV75 ext</b>	0,75	Extraídos

- Traços com 50% de CV e 50% de cimento Portland e adição de 20% de cal (em massa):

<b>NOME</b>	<b>a/mc</b>	<b>CORPO DE PROVA</b>
<b>CV40c</b>	0,40	Moldados
<b>CV40c ext</b>	0,40	Extraídos
<b>CV55c</b>	0,55	Moldados
<b>CV55c ext</b>	0,55	Extraídos
<b>CV75c</b>	0,75	Moldados
<b>CV75c ext</b>	0,75	Extraídos

TABELA 2 – 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	-

## 2.5. Moldagem dos Protótipos e CPs

Para esta pesquisa, optou-se por moldar protótipos prismáticos de 70 x 20 x 15 cm, com a intenção de aproximar o estudo de laboratório com uma viga estrutural de uma obra, e comparar o desempenho dos testemunhos extraídos destes protótipos com corpos de prova moldados e curados sob condições controladas.

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. 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 (Figuras 4 e 5).

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 6). Após a moldagem, a face superior dos prismas foi

mantida úmida por pelo menos quatro horas. 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 7). Cabe enfatizar que, durante as moldagens, não houve grandes variações de temperatura e umidade relativa do ar.

Após este período, os protótipos foram colocados ao ar livre, com seu eixo longitudinal orientado no sentido norte-sul, apoiados com a face de 20 x 70 cm sobre roletes de concreto (Figuras 8 e 9). Desta forma, os prismas ficaram armazenados até a data das extrações dos testemunhos para resistência à compressão (28 e 91 dias) e de amostras para porosimetria e MEV e pó para o ensaio de água combinada (91 dias), expostos às condições ambientais.

As Figuras a seguir mostram algumas fases da moldagem e cura dos protótipos desta pesquisa:

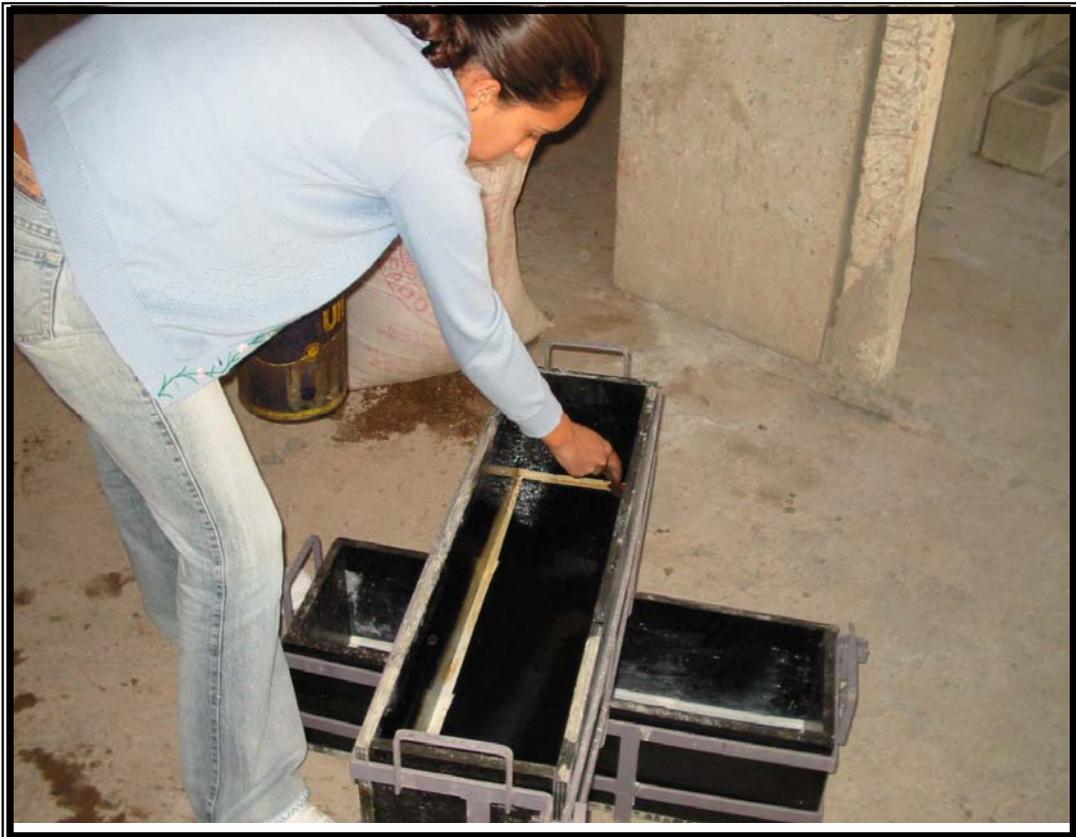


FIGURA 4.: Preparação das formas para posterior moldagem.



FIGURA 5: Formas já preparadas para a moldagem



FIGURA 6: Processo de moldagem e vibração dos protótipos



FIGURA 7: Protótipos durante a primeira semana de cura.



FIGURA 8: Protótipos curando ao ar livre.

## 2.6 Ensaios Realizados

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 75 x 20 x 15 cm e de cada um foram extraídos 6 testemunhos cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura.

Os ensaios realizados foram:

- *Resistência à compressão axial* (NBR 5738) em corpos de prova cilíndricos;
- *Teor de água combinada*, determinado segundo diretrizes de Sellevold e Justnes (1993);
- *Porosidade*, utilizando o método de porosimetria por intrusão de mercúrio;
- *Microscopia eletrônica de varredura (MEV)*.

### 2.6.1 Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados de acordo com a NBR 5738. Para estes ensaios foram moldados corpos de prova cilíndricos e extraídos de cada protótipo seis testemunhos ao todo: três testemunhos para os ensaios na idade de 28 dias e, aos 91 dias, mais três. Estes testemunhos tinham 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura e foram extraídos com uma extratora de broca diamantada do tipo copo, no sentido perpendicular ao de concretagem, conforme indicado nas Figuras 9 e 10.

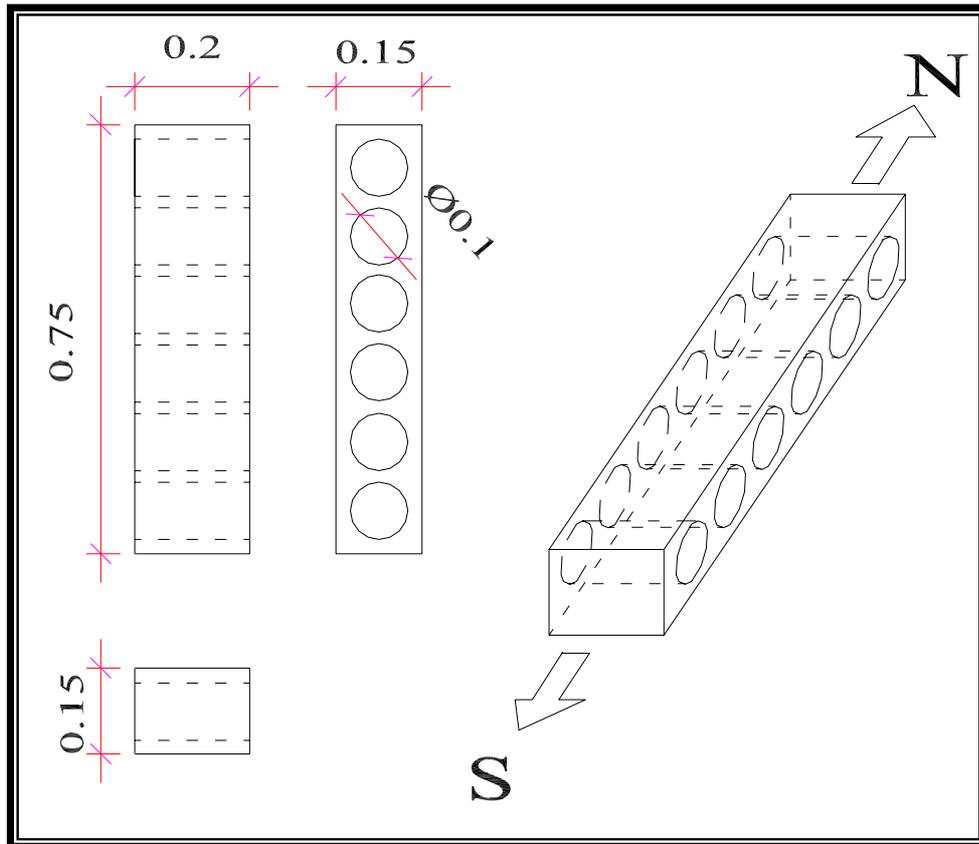


FIGURA 9: Dimensões (em metros) e furos dos protótipos.



FIGURA 10: Extração dos testemunhos dos protótipos.

#### 2.6.1.1. Considerações sobre os CPs moldados e testemunhos extraídos

A análise da resistência à compressão do material foi feita em corpos de prova cilíndricos, moldados e curados sob condições controladas, e em testemunhos com as mesmas dimensões extraídos de protótipos prismáticos curados em condições ambientais. Tal procedimento foi adotado para efeito de comparação entre os dois processos de cura, visto que a cura dos protótipos assemelha-se às condições encontradas em obras correntes da construção civil.

As condições ambientais a que o concreto está exposto durante o período de cura afetam significativamente as propriedades tanto do concreto fresco quanto do concreto endurecido (Almusallam, 2001). Variáveis como retração hidráulica, resistência à compressão e porosidade são influenciadas pelas condições ambientais (temperatura, umidade relativa, velocidade do vento) a que o concreto está submetido durante o período de cura. Assim, podemos perceber a relevância da comparação da resistência à compressão dos corpos de prova moldados e curados em câmara úmida e aqueles extraídos dos prismas, expostos às condições climáticas.

#### 2.6.2 Água combinada

O procedimento do ensaio para determinação do teor de água combinada proposto por Sellevold e Justnes (1993) e utilizado nesta pesquisa é feito com amostras de pó, conforme o roteiro abaixo:

1. Pesar cerca de 20g ( $P_i$ ) de pó em um cadinho e levá-lo à estufa à 90° C. Pesar em intervalos máximos de 1 h até a constância de massa, com erro inferior à 0,01g ( $P_{90}$ ). O teor de umidade será:

$$(P_i - P_{90})/P_i \quad (1)$$

2. Levar o cadinho ao forno, aquecendo-o até a temperatura de 550°C durante 60 min.
3. Retirar o cadinho do forno e colocá-lo num dessecador até que esfrie à temperatura ambiente, pesando, então, com precisão de 0,01g (P550).
4. O teor de água combinada é dado por:

$$(P90-P550)/P90$$

(2)

A extração das amostras de pó para os ensaios de água combinada se deu nos interstícios dos furos dos testemunhos nos protótipos, na idade de 91 dias para cada traço (Figura 11) . A coleta foi feita com uma furadeira de precisão com aspirador e filtro para o pó, observando-se as devidas profundidades de estudo (Figura 12).

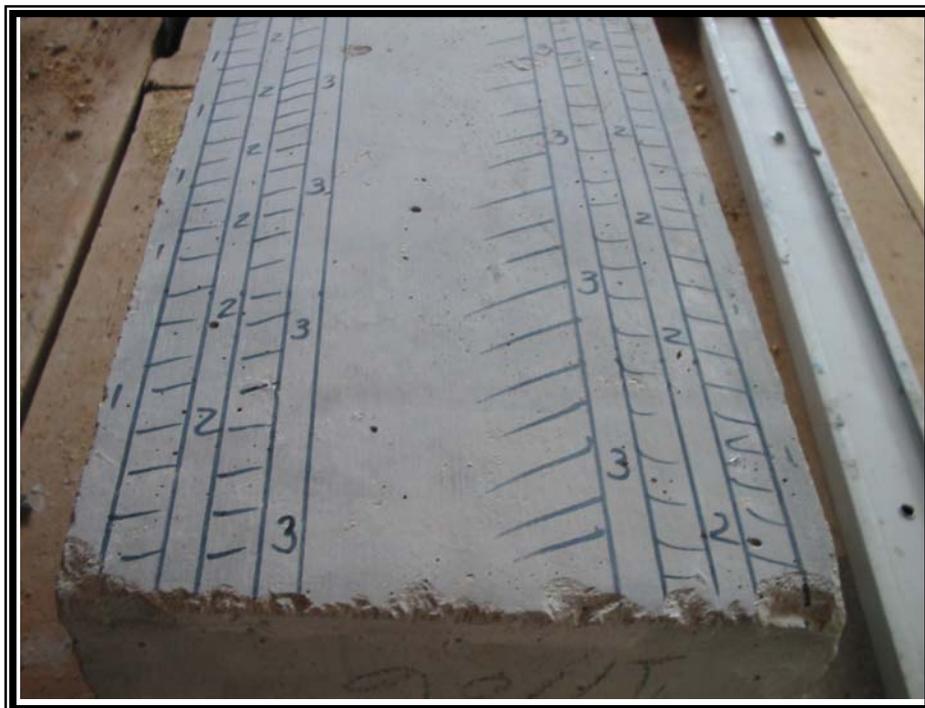


FIGURA 11: Marcação das profundidades a serem pesquisadas.



FIGURA 12: Detalhe da extração do pó dos protótipos.

Após a coleta, o pó foi peneirado com uma 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.

### 2.6.3 Porosimetria

As amostras destinadas aos ensaios de porosidade por intrusão de mercúrio e microscopia eletrônica de varredura tinham a forma cúbica, com menos de um centímetro de lado. Para cada profundidade pesquisada foram extraídas seis amostras, sendo que a extração das

amostras se deu nos interstícios dos furos dos testemunhos nos protótipos, na idade de 91 dias para cada traço. Estes cubos foram obtidos através do corte com um disco de serra diamantado e posteriormente polidos. Apesar do corte com disco ocasionar superfície plana e lisa, não há interferência decisiva na entrada do mercúrio para a realização do ensaio, uma vez que este é introduzido por pressões muito elevadas, as quais sobrepujam o efeito de eventual colmatação superficial dos poros. As principais causas que influem sobre os resultados nos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, segundo Beaudoin e Marchand (2001), são o tamanho do corpo de prova, ângulo de contato do mercúrio, a secagem da amostra, pureza do mercúrio e taxa de aplicação da pressão, não sendo realizada nenhuma menção quanto a influência da modalidade de corte, por disco ou por talhadeira, nos resultados do ensaio. Com efeito, alguns pesquisadores tem utilizado a técnica de corte com disco para a obtenção dos c.p. para o ensaio de porosimetria, entre os mais recentes pode-se citar Uchikawa *et al.* (1998) e Oliveira (2000). Por essa razão optou-se por serrar o concreto com disco de corte e não por talhadeira, por não trazer influência significativa nos resultados na distribuição dos poros e, ainda, porque a primeira opção é mais fácil e cômoda.

Após a coleta, as amostras foram mantidas imersas em álcool etílico por até uma semana, com o intuito de paralisar as reações de hidratação do cimento. Depois deste período, os cubos foram mantidos em estufa à 80°C por mais quatro dias.

#### 2.6.4 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura

Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura para obtenção das micrografias foram realizados no Laboratório de MEV da UFSM em

um Microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM 6060, com capacidade para ampliações de 5 até 300.000 vezes (Figura 14).

Estes ensaios foram realizados nos cubos extraídos de cada camada dos protótipos de concreto na idade de 91 dias. Após a extração, os cubos foram imersos em álcool etílico durante aproximadamente sete dias, com o intuito de paralisar as reações de hidratação da pasta e em seguida foram secos em estufa à 80°C por até quatro dias.

Antes dos ensaios de MEV, os cubos a serem utilizados foram mantidos em estufa por mais três dias, à temperatura de 90°C. Tal procedimento foi adotado pelo fato de o microscópio eletrônico de varredura ser muito sensível à umidade.

Como preparação ao ensaio, as amostras foram colocadas em um recipiente onde foram revestidas com uma fina camada de ouro, a fim de proporcionar as interações eletrônicas necessárias quando colocadas no microscópio (Figura 13).

Foram obtidas, no total, 72 micrografias dos traços e profundidades estudados, dos quais foram escolhidas apenas as mais representativas e/ou relevantes para serem analisadas e apresentadas neste trabalho.



FIGURA 13: Amostras em recipiente à vácuo, sendo pulverizadas com ouro.



FIGURA 14: Vista geral do microscópio eletrônico de varredura.

## CAPÍTULO III

# ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados dos ensaios de resistência à compressão, porosimetria por intrusão de mercúrio e água combinada foi realizada tomando-se o traço de referência, sem adições minerais, como parâmetro para a comparação das propriedades conferidas ao concreto pelas adições de cinza volante e cal nos níveis estudados.

Inicialmente, os dados referentes aos traços com cinza volante foram analisados como obtidos nos ensaios, nas relações  $a/mc$  de 0,40 e 0,75. Nos ensaios de resistência à compressão, para fins de plotagem da curva de Abrahms, foram ensaiadas também amostras na relação  $a/mc$  de 0,55 para estes traços. Para os traços de referência, a fim de compensar as diferenças de resistências à compressão das idades iniciais com os traços de cinza volante, foram moldadas amostras com as relações  $a/mc$  mais elevadas, 0,45 e 0,8, sendo que para os ensaios de resistência à compressão também foram moldados concretos com a relação  $a/mc$  intermediária de 0,60. Para efeito de comparação em igualdade de relação  $a/mc$  dos ensaios de resistência, distribuição de poros e água combinada com os traços com cinza volante, os valores de  $a/mc$  de 0,40 e 0,75 para o traço de referência foram calculados por regressão estatística.

De posse destes dados, foram elaborados gráficos, procurando abranger as correlações mais significativas, sempre tomando-se como parâmetro de comparação o traço de referência, bem como as relações dos traços com cinza volante entre si. No início de cada item, é feita uma referência aos resultados numéricos a partir dos quais foram feitas as

plotagens, mostrados em tabelas em igualdade de relação a/mc. Como foram estudadas três camadas do concreto (camada 1, de 0 à 10 mm; camada 2, de 25 à 35 mm e camada 3, de 50 à 60 mm), foram realizadas também comparações entre as três profundidades de um mesmo traço e entre as diferentes misturas, para os resultados de porosidade e água combinada.

Quanto à resistência à compressão, os valores analisados são a média dos resultados obtidos nos ensaios, quando o coeficiente de variação dentro do ensaio foi inferior a 5%. Caso contrário, quando a dispersão foi mais elevada, foram expurgados os valores discrepantes e tomados aqueles mais coerentes com a equação de Abrahms. Os resultados de resistência à compressão são considerados na idade de 28 e 91 dias para efeito de comparação.

### **3.1 Análise dos resultados de Resistência à Compressão**

Os valores considerados nas análises dos resultados à compressão estão representados no Quadro 5, para a idade de 28 dias, e no Quadro 6, para 91 dias. Os dados originais do traço de referência, com a/mc de 0,45, 0,60 e 0,80 estão representados em ambas as tabelas. Para efeito de comparação com os demais traços com cinza volante, foi realizada regressão, por intermédio da equação de Abrahms, para obter-se as mesmas relações a/mc (0,40, 0,55 e 0,75), cujos valores também estão representados.

Quadro 4: Resultados de 28 dias (MPa)

a/mc	Referência (ensaio)		a/mc	Referência (regressão)		CV		CV com cal	
	c.p.	Extr.		c.p.	Extr.	c.p.	Extr.	c.p.	Extr.
<b>0,45</b>	60,2	64,9	<b>0,40</b>	73,7	79,9	36,1	41,2	41,2	44,0
<b>0,60</b>	38,4	39,6	<b>0,55</b>	43,6	45,9	21,5	27,2	28,0	27,5
<b>0,80</b>	23,3	23,8	<b>0,75</b>	26,1	26,7	13,9	8,8	12,2	12,6
<b>r</b>	0,999	1,000	<b>r</b>	0,999	1,000	0,999	0,964	0,977	0,989

Quadro 5: Resultados de 91 dias (MPa)

a/mc	Referência (ensaio)		a/mc	Referência (regressão)		CV		CV com cal	
	c.p.	Extr.		c.p.	Extr.	c.p.	Extr.	c.p.	Extr.
<b>0,45</b>	64,3	75,5	<b>0,40</b>	74,1	88,9	51,2	50,6	56,2	57,1
<b>0,60</b>	38,9	44,1	<b>0,55</b>	46,7	53,3	35,0	34,7	36,3	37,4
<b>0,80</b>	28,0	30,0	<b>0,75</b>	29,9	32,4	20,4	15,0	19,8	19,5
<b>r</b>	0,993	0,995	<b>r</b>	0,993	0,995	0,993	0,975	0,995	0,992

### 3.1.1 Análise conjunta dos resultados de 28 e 91 dias

Os gráficos da Figura 15 mostram as resistências à compressão obtidas para os CPs moldados e para os testemunhos extraídos aos 28 e aos 91 dias.

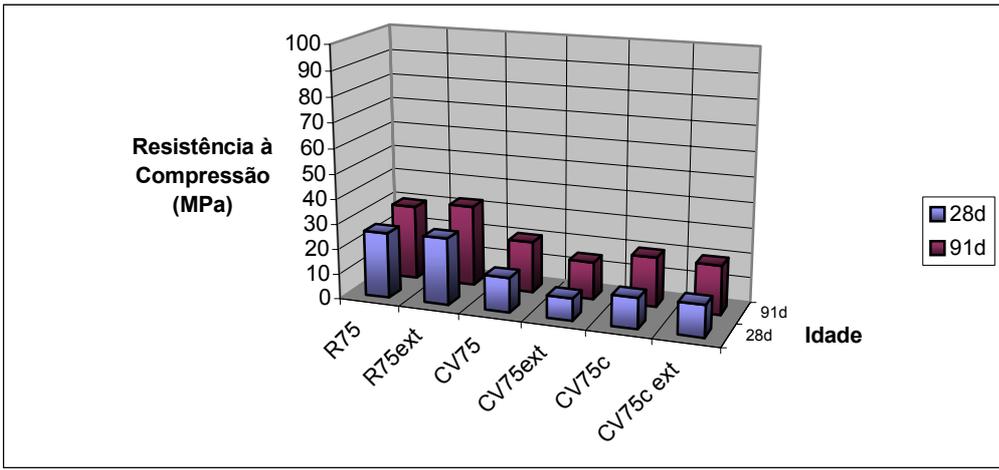
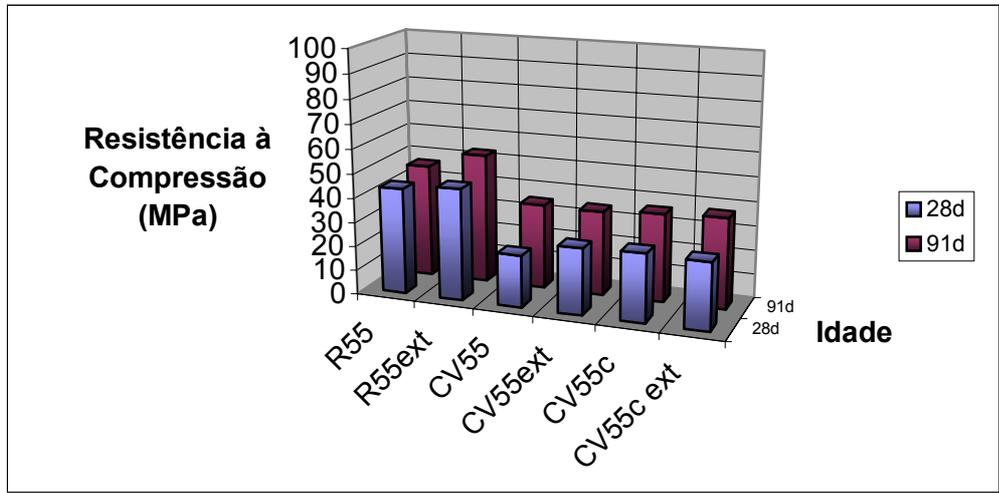
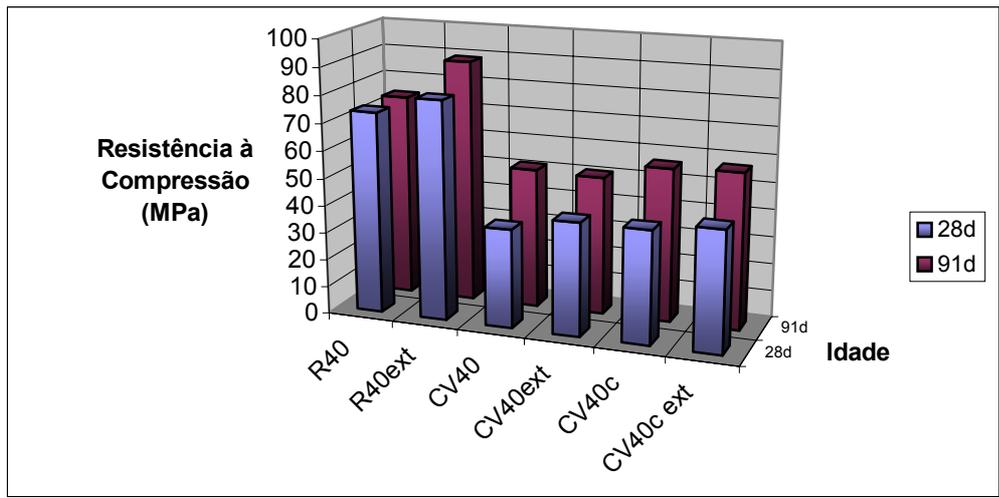


FIGURA 15: Resistência à compressão aos 28 e 91 dias para todas as a/mc.

O 1º gráfico mostra uma comparação global das resistências à compressão dos traços com relação a/mc de 0,40 nas idades de 28 e 91 dias. O traço R40, para os CPs moldados, apresentou um aumento de resistência de apenas 0,5% (0,4 MPa) de 28 para 91 dias. Para os testemunhos extraídos, R40 apresentou um aumento um pouco mais significativo na resistência de 28 para 91 dias: 10% (9 Mpa). Para os CPs do traço com cinza volante e mesma relação a/mc, de 28 para 91 dias foi 29% (15 MPa). Para este mesmo traço, os testemunhos extraídos tiveram um aumento de 18,5% (9,4 MPa) na resistência de 28 para 91 dias. O traço com cal apresentou, para os CPs moldados, um aumento de 27% (15 MPa) na resistência à compressão com o aumento da idade considerada. Os testemunhos mostraram um acréscimo de 23% (13 MPa) na resistência à compressão.

O 2º gráfico apresenta a variação de resistência à compressão dos traços com a/mc de 0,55 de 28 para 91 dias. Os CPs moldados de R55 apresentaram um aumento de 6,6% (3,1 MPa) em sua resistência à compressão neste período. Para este mesmo traço, os testemunhos extraídos demonstraram um acréscimo de 14% (7,4 MPa) em sua resistência de 28 para 91 dias. Para os CPs do traço CV55, houve um aumento na resistência à compressão de 38,5% (13,5 MPa) neste período. Os testemunhos do traço CV55 desenvolveram uma resistência aos 91 dias 21,6% (7,5 MPa) superior à de 28 dias. Para o traço com cal, CV55c, os CPs aumentaram sua resistência em 23% (8,3 MPa) e os testemunhos extraídos do protótipo deste traço aumentaram sua resistência em 26,5% (9,9 MPa).

O 3º gráfico mostra a evolução da resistência à compressão dos traços com fator a/mc de 0,75 com a idade. Nesta relação, os CPs de R75 tiveram um aumento de 13% (3,8 MPa) em sua resistência à compressão de 28 para 91 dias. Para este mesmo traço, os testemunhos extraídos demonstraram um aumento de resistência de 17,6% (5,7 MPa) neste período. Os CPs do traço CV75 aumentaram sua resistência em 32% (6,5 MPa) de 28 para 91 dias e os testemunhos deste traço tiveram um aumento de 41% (6,2 MPa) em sua resistência à compressão. Neste período, os CPs do traço com cinza volante e cal desta relação a/mc

apresentaram um aumento de 38% (7,6 MPa ) na sua resistência à compressão. Os testemunhos de CV75c demonstraram um aumento de 35% (6,9 MPa).

Observa-se que, para todos os traços e relações a/mc, os traços de referência apresentaram acréscimos pequenos de resistência, tanto para os CPs quanto para os testemunhos, em comparação com os traços com CV. Este comportamento está dentro do esperado, visto que, conforme o exposto no capítulo I deste trabalho, os traços com CV apresentam resistências relativamente baixas nas primeiras idades. Com o passar do tempo, entretanto, à medida que as reações pozolânicas acontecem, a resistência à compressão aumenta em maior proporção. Na idade de 91 dias, a mais avançada desta pesquisa, os traços com cinza volante, com e sem cal, ainda apresentaram resistências menores que as dos traços de referência nas três relações a/mc, tanto para CPs moldados quanto para os testemunhos extraídos. Porém, a taxa de aumento de resistência à compressão dos traços com CV, em valores absolutos, mostrou-se significativamente superior aos dos traços de referência, principalmente os traços com a/mc mais baixas, o que indica que, em idades ainda mais avançadas, os traços com a pozolana podem diminuir as diferenças de resistência à compressão com o concreto de referência.

Deve-se salientar que os traços com cal, em geral, apresentaram resistências superiores aos traços correspondentes com cinza volante sem cal para esta idade. A causa provável deste comportamento é a retenção de água proporcionada pela cal, fornecendo uma reserva interna de umidade para as reações de hidratação durante o período de cura, bem como a maior reserva de  $\text{Ca(OH)}_2$  para a formação de novas fases de C-S-H quando da reação pozolânica. É importante notar, portanto, que aos 28 dias as resistências são relativamente baixas por haver menor teor C-S-H secundário formado nesta idade.

Analisando-se nos gráficos os valores para 91 dias, percebe-se que as diferenças entre as resistências à compressão de todos os traços, tanto CPs moldados quanto testemunhos extraídos, diminuem entre si com o aumento da relação a/mc. Os traços com CV e cal demonstraram resultados semelhantes entre CPs e testemunhos nas três relações a/mc,

comprovando que a reserva de umidade fornecida pela cal proporciona, para o concreto exposto ao meio ambiente, um processo de cura semelhante aos CPs armazenados em câmara úmida. Em geral, ficou claro nas análises na idade de 91 dias que os traços com cinza volante e cal apresentaram resistências à compressão ligeiramente superiores aos traços com cinza volante sem cal. Cabe salientar que, com exceção do traço CV75, todos os outros apresentaram uma resistência mais elevada nos testemunhos extraídos dos protótipos curados ao ar livre, do que nos CPs moldados e curados em condições controladas. Isto deve-se, provavelmente, ao fato de que para uma relação a/mc mais elevada e altos teores de CV, o desenvolvimento da resistência de tal traço torna-se mais lenta quando a estrutura não está exposta às condições de umidade e temperatura controladas.

### 3.1.2 Análise da relação CPs moldados X Testemunhos aos 28 dias

O gráfico da Figura 16 apresenta os índices de variação da resistência à compressão dos CPs moldados para os testemunhos extraídos de um mesmo traço, para todas as misturas pesquisadas aos 28 dias.

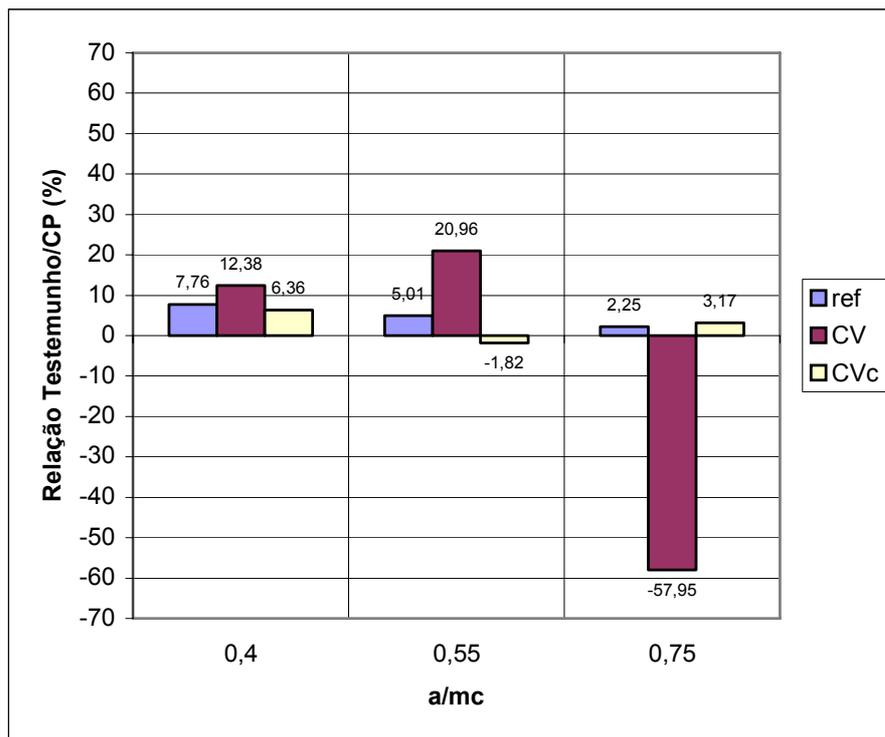


FIGURA 16: Variação da resistência à compressão aos 28 dias entre CPs e testemunhos extraídos.

Para os traços de referência, observa-se que, em todas as relações a/mc, os testemunhos demonstraram resistência maior que os CPs. Porém, com o aumento da relação a/mc, a taxa de variação de resistência entre CPs e testemunhos para os traços de referência diminuíram: de 7,76% (6,2 MPa de diferença) na relação a/mc = 0,40 para 5,01% (2,3 MPa) na relação a/mc = 0,55 e 2,25% (0,6 MPa) na relação a/mc = 0,75.

O traço com cinza volante sem cal foi a mistura que apresentou as maiores diferenças de resistência entre CPs e testemunhos. Na relação a/mc = 0,40, os testemunhos apresentaram resistências de 12,38% (5,1 MPa) maiores que os CPs. Os testemunhos do traço CV55 também apresentaram resistência à compressão superior aos CPs: 20,96% (5,7 MPa). Porém, na relação a/mc de 0,75, o comportamento apresentado pelas misturas com CV sem cal nas duas relações anteriores se inverteu:

os testemunhos demonstraram uma resistência à compressão 57,95% (5,1 MPa) *inferior* àquelas apresentadas pelos CPs.

As misturas com CV e cal foram as que apresentaram as menores diferenças entre as resistências dos CPs e dos testemunhos. Para  $a/mc = 0,40$ , os testemunhos de CV40c mostraram resistência à compressão 6,36% maior que os CPs. Para  $a/mc = 0,55$ , porém, as maiores resistências foram obtidas com os CPs: 1,82% maior do que as resistências dos testemunhos. Para o traço CV75c, no entanto, os testemunhos voltaram à apresentar uma resistência à compressão ligeiramente superior aos CPs: 3,17%.

Para melhor visualização das diferenças entre os CPs moldados e os testemunhos extraídos, os gráficos da Figura 17 a seguir apresentam a comparação direta das resistências para cada relação  $a/mc$ .

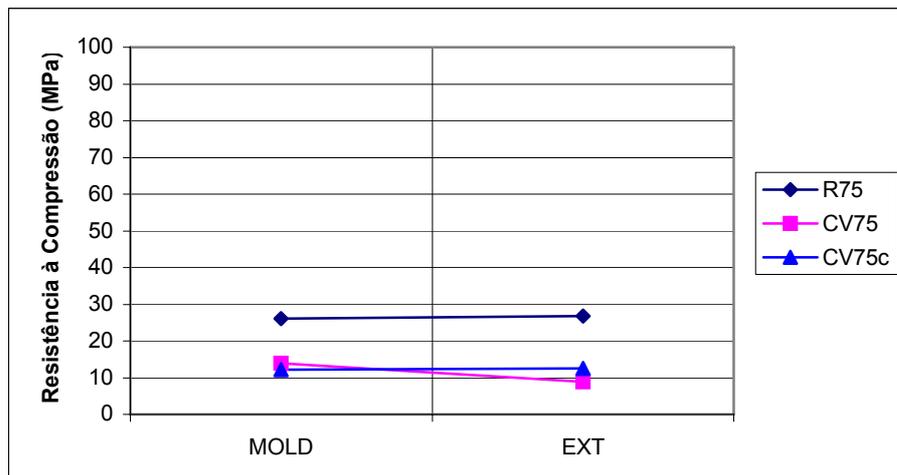
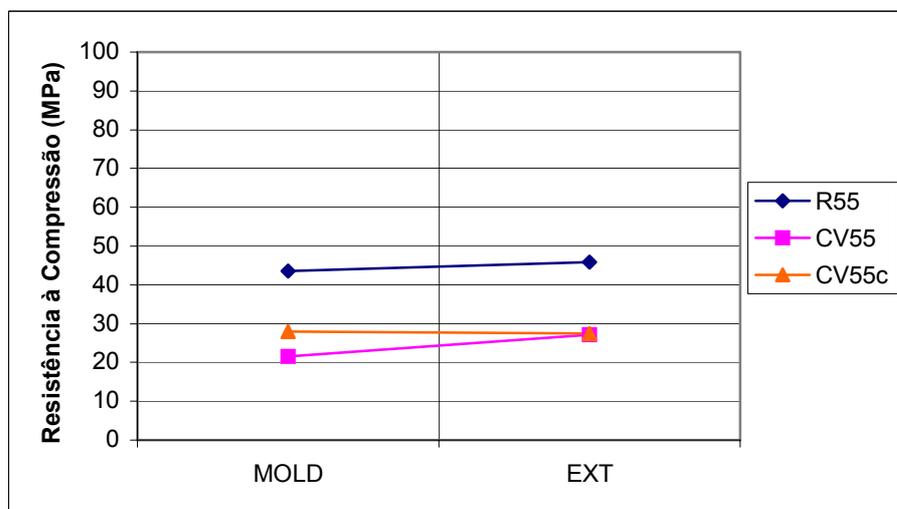
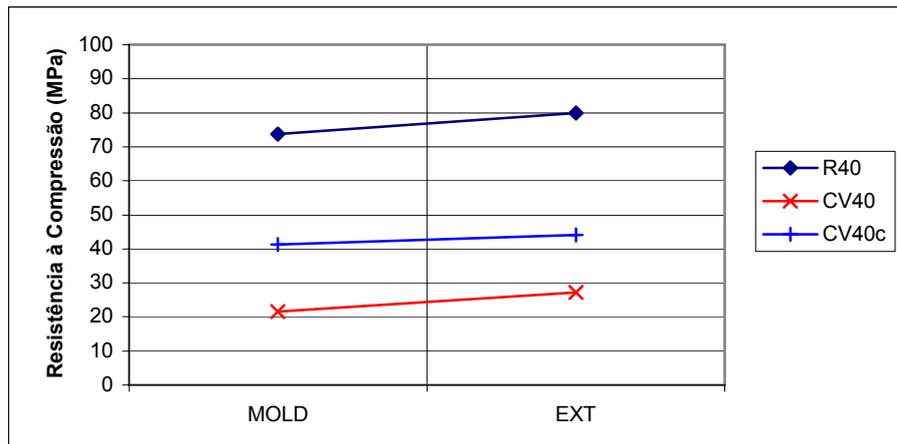


FIGURA 17: Variação da resistência à compressão aos 28 dias entre CPs e testemunhos extraídos para todas as a/mc.

O 1º gráfico apresenta a variação de resistência entre CPs moldados e testemunhos extraídos dos protótipos curados ao ar livre para os traços de  $a/mc = 0,40$  aos 28 dias. Nota-se que os testemunhos extraídos apresentaram resistências, em média, 8% superiores aos CPs moldados.

No 2º gráfico, observa-se que, para os traços R55 e CV55, os testemunhos demonstraram resistências à compressão superiores aos CPs, mas o traço CV55c apresentou um comportamento inverso: a resistência à compressão dos testemunhos ficou *abaixo* da resistência dos CPs.

Conforme o que pode ser observado no 3º gráfico, para  $a/mc = 0,75$ , os testemunhos extraídos dos protótipos de R75 e CV75c apresentaram resistências superiores à apresentadas pelos CPs destes traços. Porém, para o traço com cinza volante sem cal, essa relação mostrou-se inversa: os CPs apresentaram resistências maiores que os testemunhos.

Cabe citar que, os CPs somente foram retirados da câmara úmida no dia dos ensaios de resistência à compressão, estando, portanto, saturados de umidade. Os testemunhos foram extraídos um dia antes dos ensaios e mantidos em local seco. Tal diferença no teor de umidade do concreto dos CPs e dos testemunhos pode ter influenciado os resultados de resistência à compressão obtidos.

### 3.1.3 Análise da relação CPs moldados X Testemunhos aos 91 dias

O gráfico da Figura 18 apresenta os índices de variação da resistência à compressão entre os CPs moldados e curados em câmara úmida e os testemunhos extraídos dos protótipos curados ao ar livre aos 91 dias para todos os traços.

Os testemunhos do traço de referência apresentaram, para todas as relações  $a/mc$ , resistências à compressão superiores às dos CPs

moldados. Observa-se que, à medida que a relação a/mc aumenta, a diferença de resistência entre testemunhos e CPs diminui. Para R40, os testemunhos apresentaram resistências 16,65% (14,8 MPa) superiores às dos CPs. Na relação 0,55, os testemunhos do traço de referência obtiveram resistências 12,38% maiores (6,6 MPa) que os CPs, e para a/mc = 0,75, a diferença caiu para 7,72% (2,5 MPa).

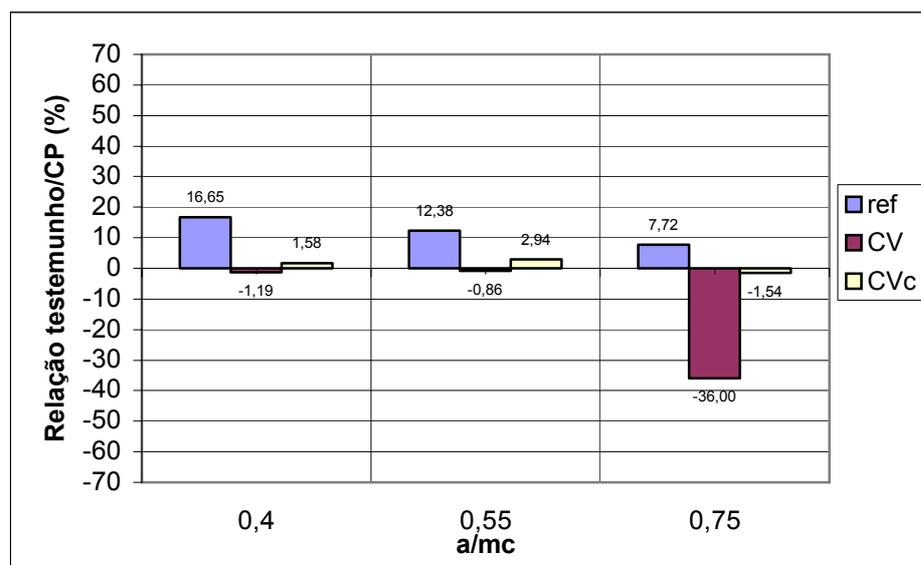


FIGURA 18: Variação da resistência à compressão aos 91 dias entre CPs e testemunhos extraídos.

Nas misturas com cinza volante sem cal, observou-se que os testemunhos apresentaram, aos 91 dias, resistências à compressão menores que os CPs, para todas as relações a/mc estudadas. Os testemunhos extraídos dos protótipos de CV40 apresentaram resistências 1,19% (0,6 MPa) menores que os CPs moldados deste traço. Na relação 0,55, a resistência dos testemunhos de CV55 ficou ligeiramente abaixo da apresentada pelos CPs: 0,86% (0,3 MPa). Para CV75, as resistências dos testemunhos ficaram 36% (5,4 MPa) abaixo da resistência dos CPs.

Para o traço com CV e cal, os testemunhos extraídos apresentaram resistências maiores que os CPs nas duas relações a/mc mais baixas. Porém, para a/mc=0,75, a resistência dos CPs foi mais alta.

Os testemunhos de CV40c mostraram-se 1,58% mais resistentes que os CPs e para CV55c, a foi 2,94% superior à dos CPs. No entanto, para  $a/mc=0,75$  esta tendência se inverteu: os testemunhos apresentaram resistências 1,54% inferiores às apresentadas pelos CPs.

Os gráficos da Figura 19 mostram a variação da resistência à compressão aos 91 dias entre CPs e testemunhos extraídos para todas as  $a/mc$ .

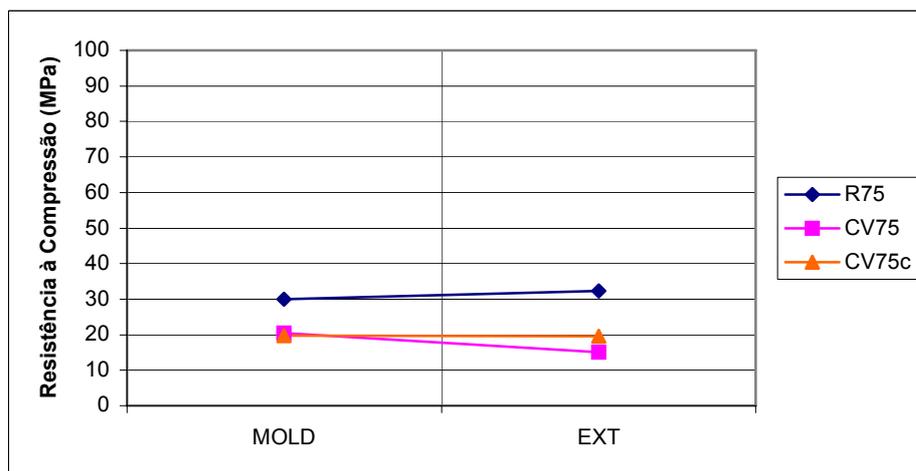
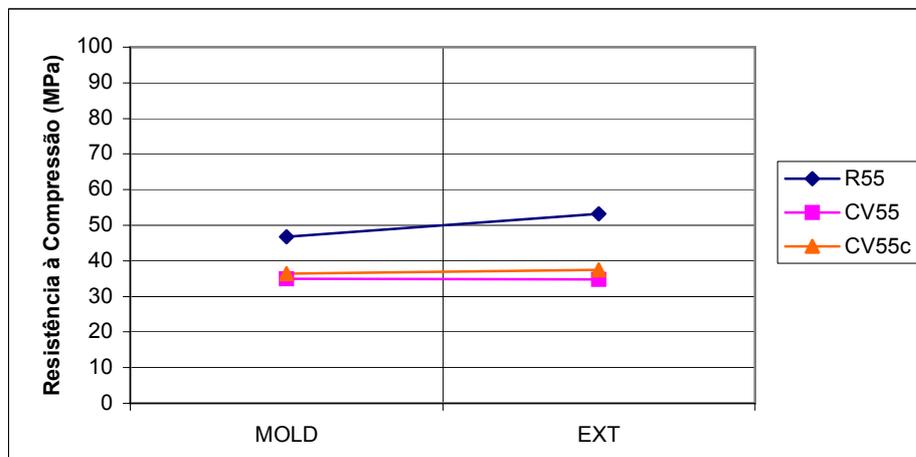
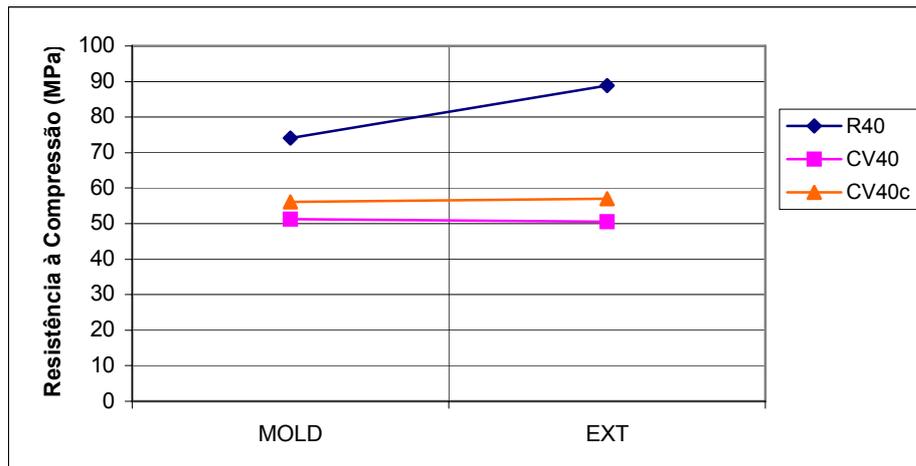


FIGURA 19: Variação da resistência à compressão aos 91 dias entre CPs e testemunhos extraídos para todas as a/mc.

O 1º gráfico apresenta as variações de resistência entre CPs e testemunhos para os traços de relação  $a/mc$  de 0,40 aos 91 dias. Observa-se que o traço de referência e o traço com cinza volante e cal apresentaram resistências maiores nos testemunhos, ao passo que o traço com cinza volante sem cal, demonstraram mais resistência nos CPs moldados.

As variações de resistência à compressão entre CPs e testemunhos para os traços com  $a/mc = 0,55$ , apresentadas no 2º gráfico, demonstram que, para R55 e CV55c, as resistências dos testemunhos mostrou-se maior do que as dos CPs. Para CV55, os CPs mostraram-se mais resistentes do que os testemunhos.

No 3º gráfico estão representadas as variações de resistência entre CPs e testemunhos dos traços com relação  $a/mc=0,75$ , aos 91 dias. Observa-se que, nesta relação  $a/mc$ , apenas os testemunhos do traço de referência apresentaram resistências superiores às dos CPs. Para CV75 e CV75c, os testemunhos demonstraram resistências inferiores às apresentadas pelos CPs. A possível causa para isso é que, para esta  $a/mc$ , o diâmetro crítico dos poros é maior, ocorrendo, para os testemunhos, uma maior interação com o meio ambiente, ou seja, ocorre a perda de água mais rápida do que nos CPs curados em câmara úmida. Devido ao maior diâmetro crítico dos poros, os CPs, mesmo retirados da câmara úmida no dia dos ensaios, podem ter perdido umidade mais rapidamente, ou seja, poderiam estar mais secos no momento do ensaio na prensa.

### 3.1.4 Discussão geral dos resultados de resistência à compressão

De uma maneira geral, verificou-se a validade de dois princípios bem conhecidos da tecnologia do concreto: a resistência à compressão do concreto aumenta com a diminuição do fator  $a/mc$ ; a adição de cinza volante promove um retardamento do desenvolvimento da resistência do concreto.

A adição de cal ao concreto com cinza volante promoveu índices de resistência ligeiramente maiores que os traços com cinza volante sem cal.

A diferença de resistência entre os traços de referência e os traços com cinza volante diminuiu de 28 para 91 dias, o que permite supor que, em idades ainda mais avançadas, os concretos com cinza volante podem diminuir a diferença de resistência que os separa dos concretos de referência.

A adição de cal ao concreto proporciona uma retenção de água que fica disponível para a hidratação e cura, o que pode resultar em resistências sensivelmente superiores do que nos traços sem cal.

Na comparação entre CPs e testemunhos, foram confirmadas observações de Parrot (2000) e Bouzoubaâ *et al.* (2001), no que diz respeito à cura do concreto: as condições climáticas do ambiente onde está inserida a estrutura durante o período de cura influenciam diretamente nas características microestruturais e mecânicas do concreto durante sua vida útil.

A cura ao ar livre, conforme o observado, proporcionou o desenvolvimento de resistências superiores às aquelas observadas em CPs moldados e curados sob condições controladas, para relações  $a/mc$  mais baixas ( $<0,55$ ). Porém, é bem conhecida a importância da cura das estruturas de concreto, pelo maior período de tempo possível imediatamente após a moldagem, seja através da aspersão de água, cura

química ou outros métodos, antes que a estrutura fique definitivamente exposta aos fatores climáticos. Há que se observar ainda que o desenvolvimento das características microestruturais do concreto, além da resistência à compressão, dependem diretamente do tempo e da qualidade da cura proporcionada ao concreto após a moldagem.

### **3.2 Análise dos resultados de Porosimetria**

#### **3.2.1 Análise da distribuição dos tamanhos dos poros em igualdade de relação $a/mc$**

Foram analisados os resultados de cada traço para as três profundidades para as relações  $a/mc$  estudadas. Os resultados referentes ao ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio para as três camadas estudadas em cada traço são mostrados na Tabela 3. Nesta análise, foi usada a classificação dos poros segundo Mindess & Young (1981), exposta na revisão bibliográfica deste trabalho, *item 1.1*.

O critério utilizado para obter-se os diâmetros de poros dos traços R40 e R75 a partir dos resultados de R45 e R80, respectivamente, pressupõe um comportamento exponencial da relação *diâmetro de poros x relação  $a/mc$* , semelhante à Curva de Abrahms, tendo em vista experiência adquirida em pesquisas anteriores realizadas no âmbito do GEPECON.

##### **3.2.1.1 Diâmetro crítico**

Diâmetro crítico pode ser definido como o diâmetro a partir do qual ocorre a conectividade entre os poros do material.

No gráfico da Figura 20, está representada a variação do diâmetro crítico dos poros em cada profundidade para todos os traços estudados.

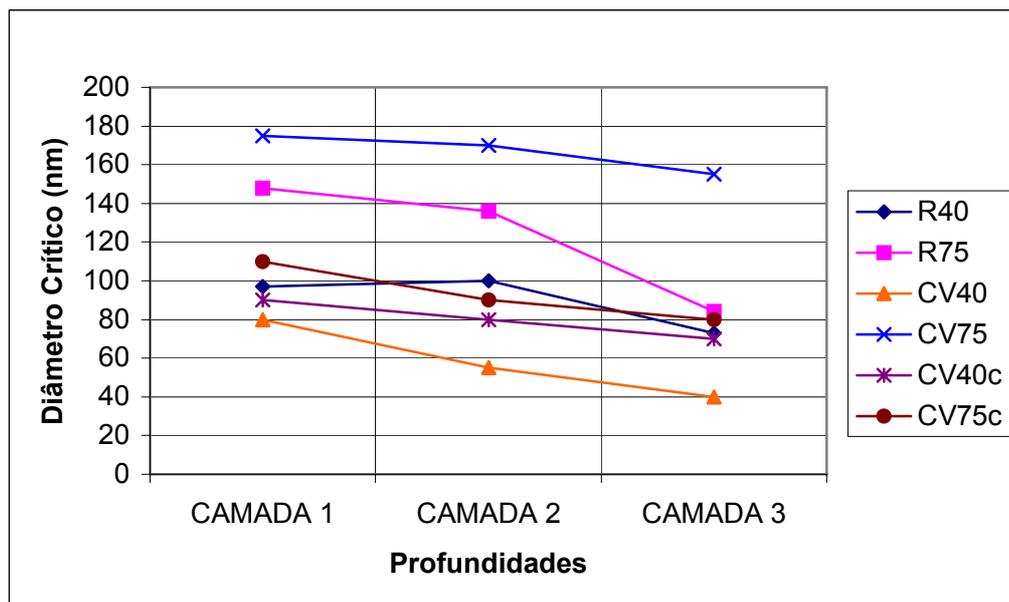


FIGURA 20: Variação do diâmetro crítico com o aumento da profundidade da camada de revestimento.

Os traços com relação  $a/mc$  de 0,75 apresentam diâmetros críticos maiores, sendo que os valores mais altos são os do traço CV75, que variou de 175 nm na camada 1 para 155 nm na camada 3. No traço CV75c os diâmetros críticos ficaram abaixo dos valores dos traços CV75 e R75. Isso pode ser atribuído ao fato de que a cal fornece uma reserva de umidade ao concreto proporcionando, durante o período de cura, uma maior hidratação nestes concretos, aumentando o teor de C-S-H. Em todos os traços, o diâmetro crítico dos poros diminui com o aumento da profundidade considerada, pelo fato de que, conforme o exposto na revisão bibliográfica deste trabalho, há entre a forma e o concreto a formação de um filme de água, similarmente ao “efeito parede” que ocorre entre a pasta e o agregado. Desta forma, há um aumento da relação  $a/mc$  na parte mais superficial do concreto, ocasionando maior porosidade nesta área. À medida que aumenta a profundidade do concreto, os efeitos desse filme de água diminuem, diminuindo também a dimensão dos

poros. Observa-se que nos traços com cinza volante com ou sem cal para relações  $a/mc$  de 0,40, os valores do diâmetro crítico nas três camadas ficaram abaixo daqueles obtidos do traço de referência correspondente, com queda de 17,5% e 7,2% para os traços CV40 e CV40c, respectivamente, em relação ao R40 na camada 1, de 45% e 20% na camada 2 e de 45% para CV40 e 4% para CV40c em relação à referência.

Excetuando-se os traços extremos, CV75 e CV40, todas as outras misturas tiveram, para a camada 3, seus diâmetros críticos dentro da faixa entre 70 e 85 nm, enquanto que para a camada 1 se situaram entre 90 e 150 nm. Nos traços com cinza volante e relação  $a/mc = 0,40$ , observa-se que o diâmetro crítico dos poros de CV40 apresentam dimensões 11% menores que os de CV40c na camada 1 e 43% menores na camada 3. Para  $a/mc = 0,75$  na camada 1, o diâmetro crítico dos poros do traço com cinza volante e sem cal apresentaram-se 37% maiores que os do traço com cal e, na camada 3, os poros de CV75 tiveram um diâmetro crítico 48,4% maiores que os apresentados por CV75c.

Esse comportamento é explicado pelo fato de que, com uma relação  $a/mc$  maior, há mais vazios na pasta, e assim, o hidróxido de cálcio gerado pela cal tem mais espaço para se desenvolver, reagindo com a cinza volante e formando novas fases de silicato de cálcio hidratado, diminuindo o diâmetro crítico dos poros do traço com cal. Nos traços com  $a/mc = 0,40$ , o volume de vazios da pasta é menor, entretanto o menor teor de CH remanescente, cujos cristais são de maior tamanho, produz menor afastamento entre as partículas sólidas, gerando maior diâmetro crítico para CV40c em relação à CV40.

No gráfico da Figura 21 apresenta-se o diâmetro crítico dos poros para cada traço.

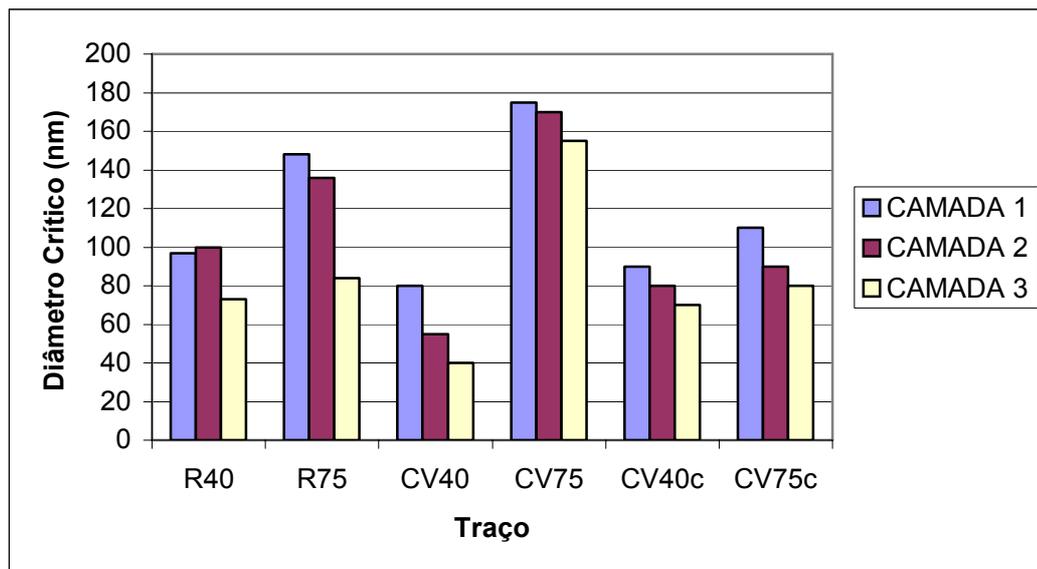


FIGURA 21: Diâmetro crítico dos poros para cada traço.

Observa-se que os traços com cinza volante e cal tiveram uma variação menor no seu diâmetro crítico com o aumento da relação a/mc de 0,40 para 0,75: na camada 1, houve um aumento de 20 nm e nas camadas 2 e 3, o aumento foi de 10 nm com o aumento de a/mc. Para os traços com cinza volante sem cal, a variação dos valores do diâmetro crítico para a mesma variação de a/mc foi maior, com aumento de 95 nm na camada 1 e 115 nm nas camadas 2 e 3.

Para os traços com cal, este comportamento pode ser atribuído ao fato de que há mais formação de C-S-H, devido a maior disponibilidade de CH, formando mais compostos hidratados, preenchendo os espaços vazios da pasta. Com a adição de cinza volante, há um aumento na superfície total dos poros com diminuição do seu tamanho (refinamento) e, como consequência, do diâmetro crítico. Esta tendência diminui grande parte dos mecanismos responsáveis pelo transporte de fluidos através dos poros.

### 3.2.1.2 Poros menores que 10 nm (poros do gel)

O gráfico da Figura 22 apresenta o teor de poros do gel em cada camada para todos os traços estudados.

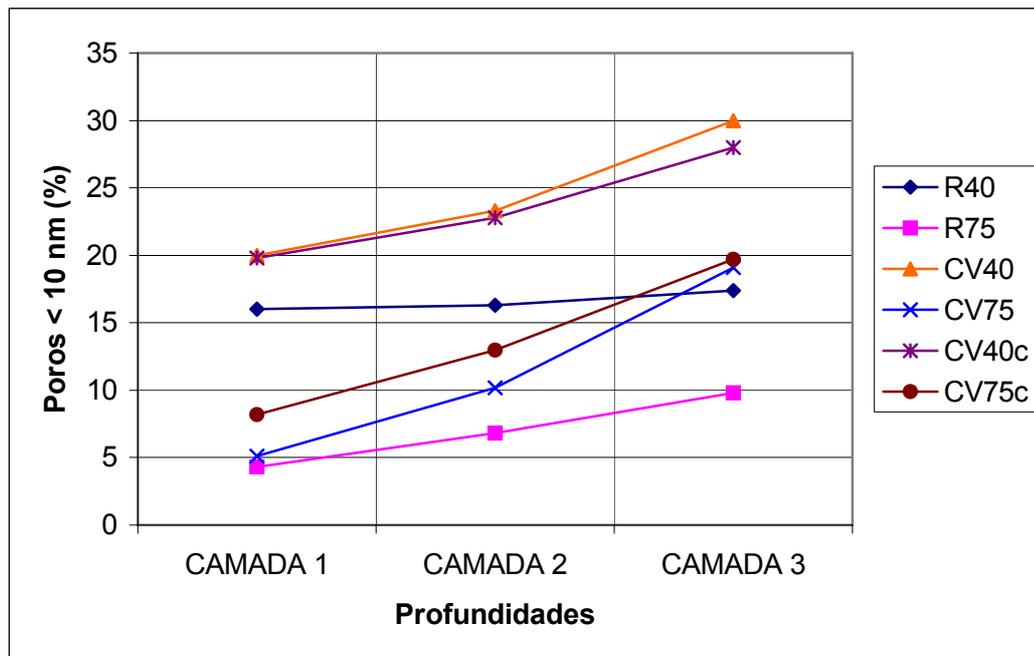


FIGURA 22: Porcentagem de poros menores que 10 nm por camada.

Nota-se a tendência em todos os traços de um refinamento dos poros à medida que aumenta a profundidade estudada. Todos os traços apresentam uma maior porcentagem de poros com diâmetro menor que 10 nm na camada mais profunda (camada 3). 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. 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 menor 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.

O gráfico da Figura 23 apresenta os poros menores que 10 nm em cada traço.

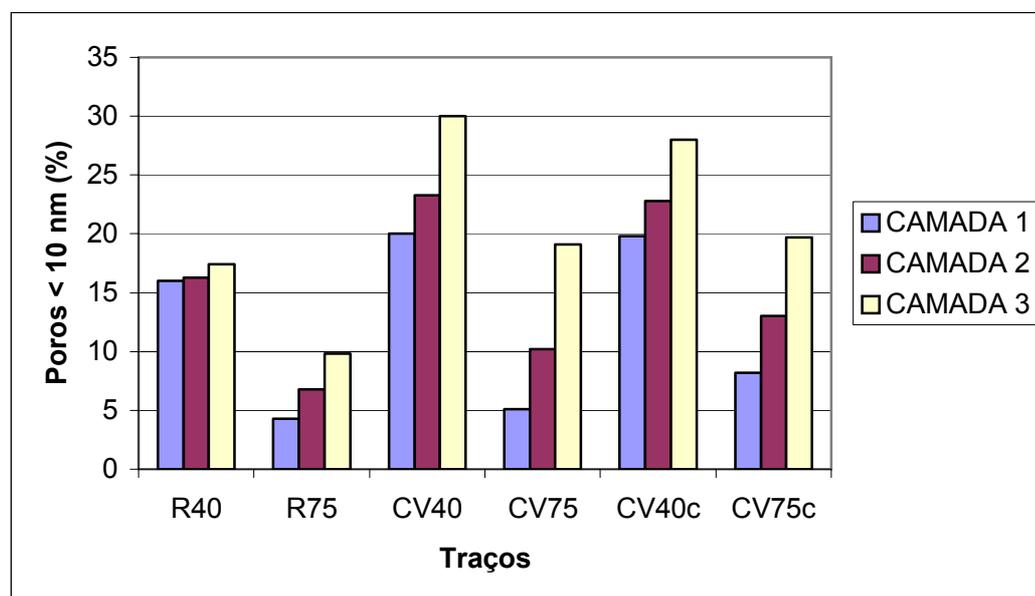


FIGURA 23: Poros menores que 10 nm em cada traço.

Tomando-se as diferenças entre as camadas extremas 1 e 3, observa-se que as variações das porcentagens de poros com diâmetro

menor que 10 nm nas camadas estudadas são menos acentuadas nos traços de referência, com aumento de 1,4% para R40 e 5,5% para R75. Para os traços com cinza volante sem cal, a variação do teor destes poros da camada 1 para a camada 3 foi de +10% para CV40 e +14% para CV75. O traço CV40c, por sua vez, apresentou um aumento de 8% na camada 1 e de 11,5% na camada 3. 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 nestes traços. 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, conforme discutido anteriormente.

### 3.2.1.3 Poros entre 10 e 50 nm (capilares médios)

O gráfico da Figura 24 apresenta o teor de poros com diâmetro entre 10 e 50 nm (mesoporos) em cada camada dos traços estudados.

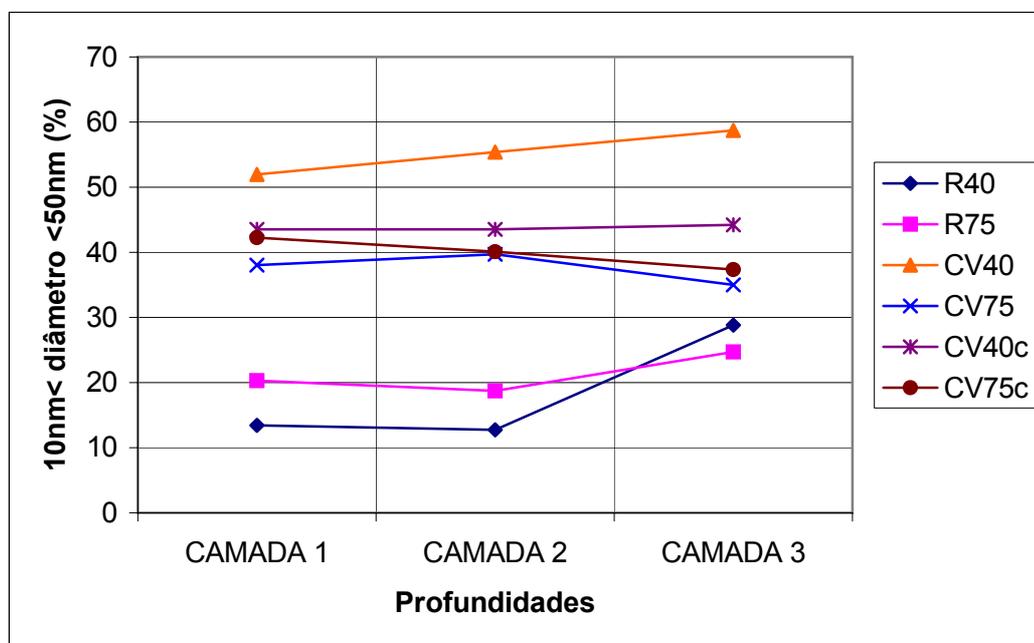


FIGURA 24: Porcentagem de mesoporos em cada profundidade.

Todas as misturas com cinza volante apresentam maior porcentagem de poros entre 10 e 50 nm maiores do que as misturas de referência. Em três das quatro misturas com cinza volante (CV75, CV40c, CV75c) os teores variaram muito pouco com o aumento da profundidade, ficando dentro da faixa de 35 a 45%. Os traços com cinza volante e cal mostraram novamente pequena variação na quantidade de poros médios para todas as profundidades nas duas relações a/mc quando comparadas aos traços correspondentes de cinza volante sem cal.

Cabe salientar que para o traço CV40c, a porcentagem de poros nesta faixa de diâmetro quase não variou com o aumento da profundidade. Nos traços de referência, a quantidade de poros médios aumenta da camada 1 para a camada 3. Esta tendência se mostrou contrária nos dois traços com cinza volante e relação a/mc de 0,75. Nestes casos, esta diminuição nos poros de diâmetro entre 10 e 50 nm com o aumento da profundidade foi causada por um aumento na quantidade de poros maiores que 50 nm nas respectivas camadas, em função do aumento da relação a/mc.

O gráfico da Figura 25 apresenta a porcentagem de mesoporos em cada traço.

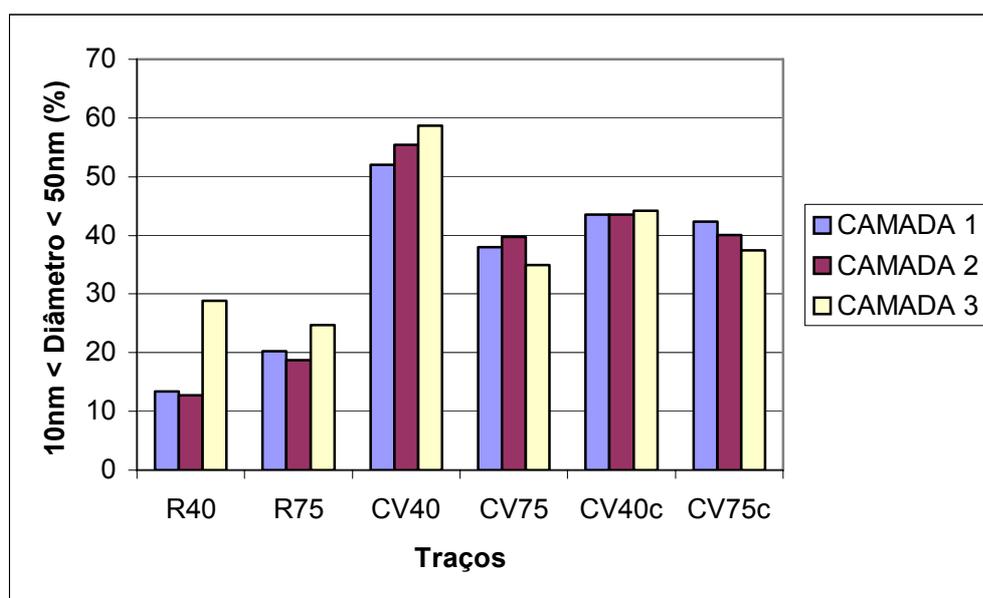


FIGURA 25: Porcentagem de mesoporos em cada traço.

Percebe-se neste gráfico uma tendência de maior quantidade de poros médios nos traços CV40 e os menores teores aparecem para os traços de referência. A variação na porcentagem de poros médios com o aumento da profundidade nos traços com cal não é significativa em relação aos outros traços, havendo leve tendência de diminuição para a camada 3 nos traços CV75 e CV75c.

#### 3.2.1.4 Poros maiores que 50 nm (capilares grandes)

O gráfico da Figura 26 apresenta o teor de poros com diâmetros maiores que 50 nm (macroporos) em cada camada dos traços estudados.

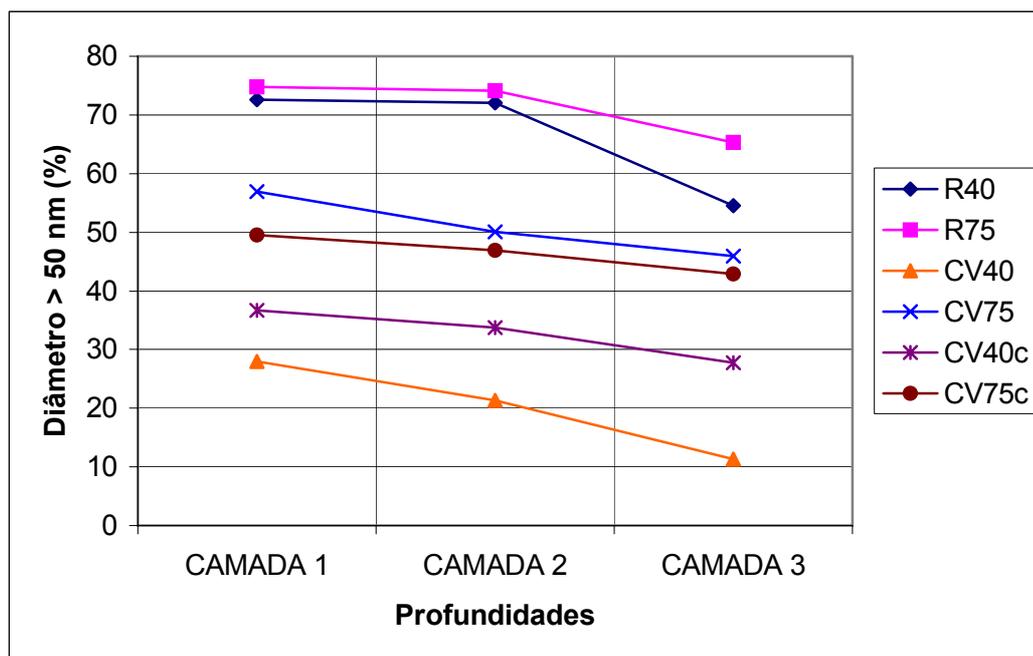


FIGURA 26: Porcentagem de macroporos em cada profundidade.

Observa-se que para todos os traços, a porcentagem de poros com diâmetros maiores que 50 nm diminui à medida que a profundidade

umenta. Isso mostra que a superfície do concreto, independente da relação a/mc ou das adições, apresenta uma porosidade maior devido ao efeito parede, o que é prejudicial em termos de durabilidade. Tal característica se deve ao fato de haver acúmulo de água na interface forma/concreto, proporcionando maior porosidade na superfície da peça estrutural. Todos os traços com cinza volante apresentam menor porcentagem de poros maiores que 50 nm nas três profundidades estudadas, em comparação com o traço de referência. Isso evidencia a influência benéfica de tal adição na diminuição da dimensão dos poros do concreto. Tal característica conferida ao concreto pela cinza volante se deve tanto pelo efeito químico, ou seja, o refinamento dos poros pelos produtos da hidratação, quanto pelo efeito físico, visto que as partículas de cinza volante, quando não hidratadas, têm papel de filler inerte.

Para as relações a/mc de 0,75 para o traço de referência e para os traços com cinza volante, observa-se que o traço com cal (CV75c) apresenta o menor teor desta faixa para as mesmas profundidades, Isso deve-se ao fato de que, com uma maior relação a/mc, há um aumento da porosidade total do concreto. Com isso, há mais espaço para a formação de cristais de hidróxido de cálcio, principalmente no traço com cal, preenchendo assim os poros. O maior espaço para formar CH disponibiliza maior contato com a cinza volante para formar C-S-H secundário, colmatando os poros.

Analisando-se as variações no teor de poros maiores que 50 nm da camada 1 para a camada 3 para todos os traços, verifica-se que, para R40 e R75, houve uma diminuição de 18% e 9% respectivamente; 16,7% para CV40 e 11% para CV75, para CV40c a variação foi de 9% e para CV75c houve uma diminuição de 6,5%. Nos traços com menor relação a/mc, o traço com cinza volante (CV40) apresentou menor porcentagem de macroporos, sendo que ambos os traços com a pozolana

apresentaram quantidades de poros com diâmetro maior que 50nm bastante inferiores que os traços de referência: na relação a/mc de 0,4, os traços CV40 e CV40c apresentaram na camada 1, respectivamente, reduções de 44,6% e 36% em relação à referência e na camada 3, essas reduções foram de 43% e 27%, respectivamente.

Para a relação a/mc 0,75 na camada 1, CV75 apresentou um teor de poros maiores que 50 nm 18% menor que o traço de referência e o traço CV75c teve um teor 25% menor que a referência para esta mesma camada. Na camada 3 os traços CV75 e CV75c tiveram reduções de 19,4% e 22,4%, respectivamente, em relação à R75. As reduções maiores observadas no traço com cal em relação à referência para o fator a/mc de 0,75 deve-se ao fato, exposto anteriormente, de que em uma relação a/mc maior há mais vazios na pasta, proporcionando mais formação de compostos hidratados devido à maior presença de CH fornecido pela cal.

No gráfico da Figura 27 apresenta-se a porcentagem de macroporos em cada traço.

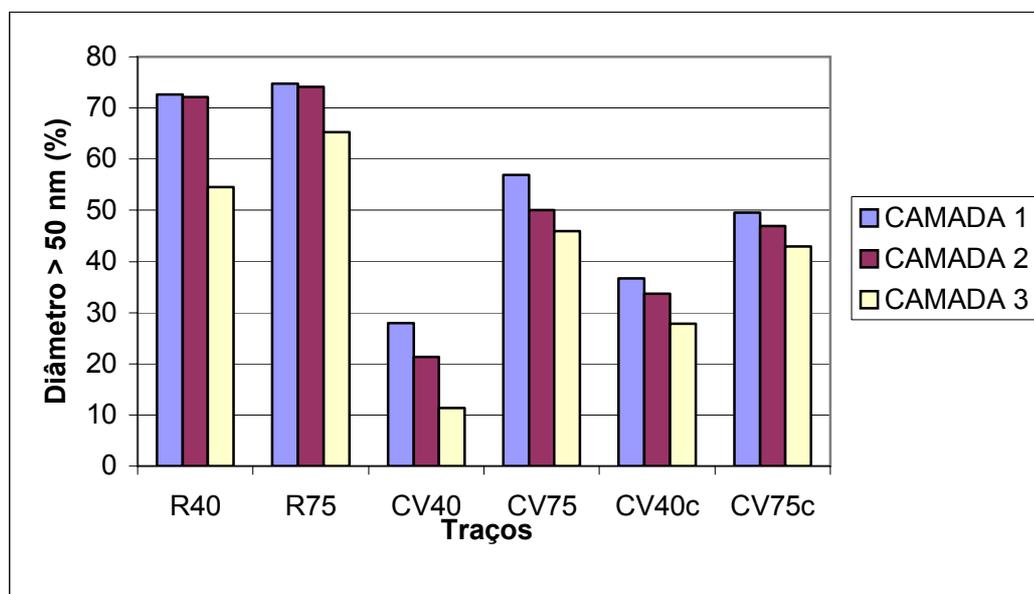


FIGURA 27: Porcentagem de macroporos em cada traço.

Os traços de referência apresentam, para ambas as relações a/mc, relativa constância na porcentagem de poros maiores que 50 nm nas camadas 1 e 2. Estes valores nos dois casos foram maiores do que aqueles dos traços com cinza volante nestas profundidades. Isso evidencia maior permeabilidade na camada de cobertura dos traços de referência em uma profundidade de até 35mm da superfície para o interior do concreto. Tal característica não se apresenta nos traços com cinza volante, onde, além dos teores de poros > 50 nm serem menores, há uma diminuição mais acentuada na quantidade dos poros da camada 1 para a camada 2. Essa característica evidencia um refinamento bastante significativo da superfície em direção ao interior do concreto, devido às reações pozolânicas, quantificados na análise do gráfico anterior (Figura 26)

#### 3.2.1.5 Análise global das dimensões dos poros por traço

Para melhorar a visualização conjunta das variações das dimensões dos poros com a profundidade a partir da superfície, são mostradas nos gráficos da Figura 28 estas variações por traço.

Conforme se pode observar no 1º gráfico, este traço apresenta uma porcentagem de poros maiores que 50 nm bastante maior em relação às outras faixas de diâmetros estudadas, situando-se acima de 70% para as camadas 1 e 2 e ao redor de 60% para a camada 3. Nas duas primeiras camadas, observa-se relativa constância na quantidade de poros das três faixas de diâmetros estudadas.

Pelo fato de ter uma maior relação a/mc, o traço R75 apresenta leve acréscimo de poros maiores que 50 nm, em relação ao R40, em torno de 2% para as camadas 1 e 2 e 11% na camada 3.

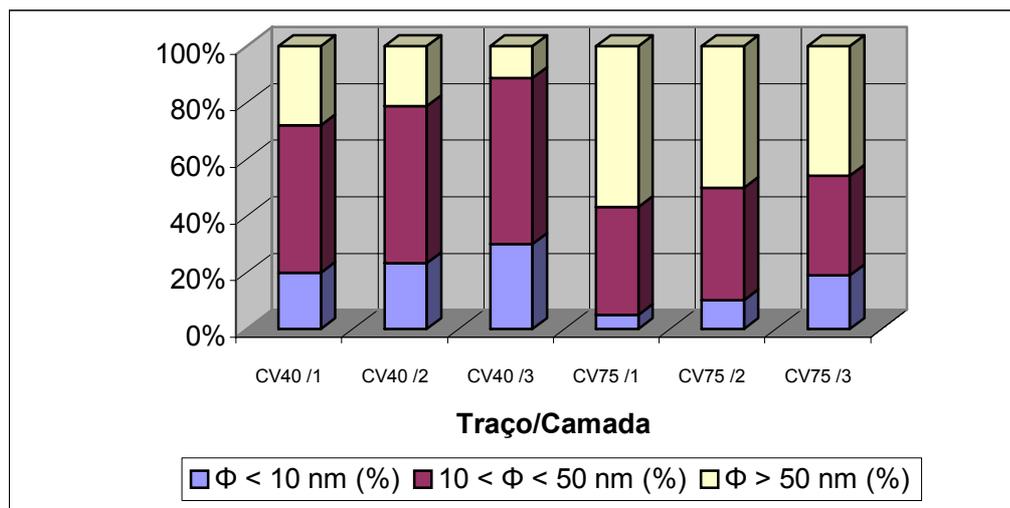
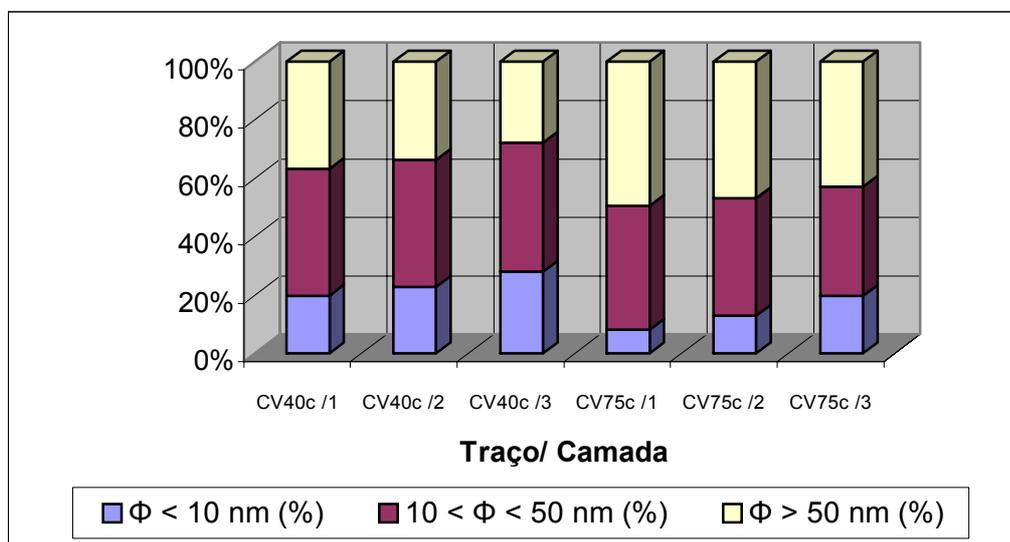
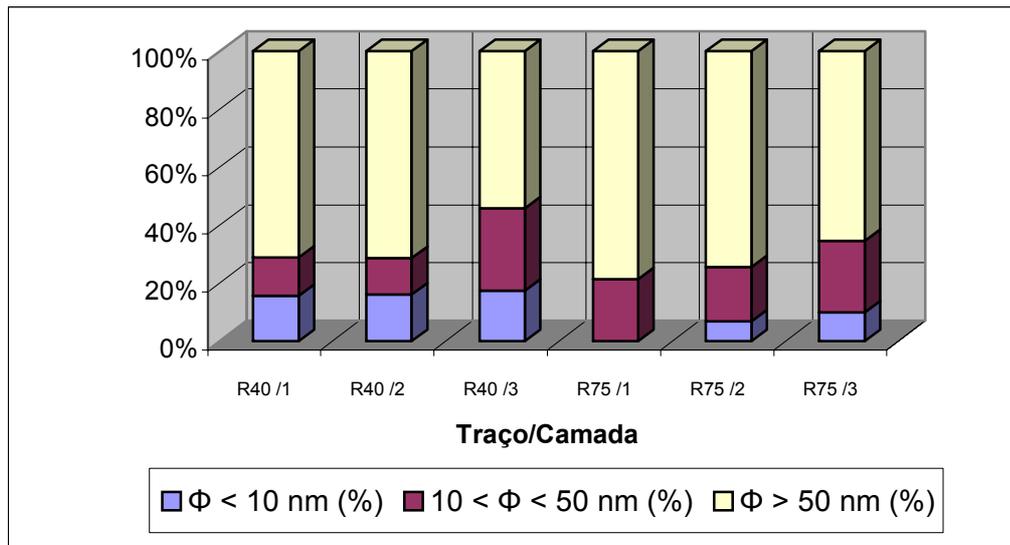


FIGURA 28: Diâmetro dos poros por profundidade dos traços.

Com relação aos poros com diâmetro entre 10 e 50 nm, R75 apresenta uma porcentagem em torno de 20% nas três profundidades, quantidades maiores do que as observadas nas camadas 1 e 2 de R40; para a camada 3, R40 apresenta 4% mais mesoporos que R75. Entretanto, os poros menores que 10 nm apresentam-se em quantidade menores que 10% nas três camadas: para R40, o teor destes poros variou em -18% da camada 1 para a camada 3, enquanto que R75 teve uma variação de -9,5% nestas mesmas profundidades. Este comportamento é coerente, pois o traço com menor relação a/mc deve apresentar poros de menor dimensão.

No traço CV40 (2º gráfico) os resultados mostram que os poros com diâmetros maiores que 50 nm ficam em torno de 30% na camada 1, diminuindo para pouco mais de 10% na camada 3. Os mesoporos, com diâmetros entre 10 e 50 nm, são em porcentagem acentuadamente maior do que os outros diâmetros estudados. À medida que a profundidade aumenta, cresce a quantidade destes poros, variando de 52% na camada 1 chegando a quase 60% na camada 3. Os poros menores que 10 nm aumentam de 20 para 30% entre as camadas 1 e 3. Na camada 2 a porcentagem de poros menores que 10 nm é maior (23%) do que a porcentagem de poros maiores que 50 nm (21%). Houve uma formação maior de poros entre 10 e 50 nm (de 52% na camada 1 à 58,7% na camada 3) em detrimento dos poros com diâmetros maiores que 50 nm, o que é benéfico para a durabilidade do concreto. Aqui fica evidenciado o efeito benéfico do refinamento dos poros ocasionado pelas reações pozolânicas, que é tanto maior quanto menor a relação a/mc, devido à maior proximidade entre as partículas. Somando-se os diâmetros menores que 50nm, observa-se que variam de cerca de 70 % na camada 1 à cerca de 90% na camada 3.

No traço CV75 a maior relação a/mc proporcionou uma porcentagem mais elevada de poros com diâmetros maiores que 50nm, variando de 57% na camada 1, a 46% na camada 3, valores superiores

de aproximadamente duas vezes aos do traço CV40 na camada 1 e quatro vezes na camada 3. Na profundidade 1, os diâmetros maiores que 50 nm correspondem a cerca de 57% da porosidade total desta camada, decrescendo para 46% na camada 3.

Os poros com diâmetros menores que 10 nm, ao contrário, tem sua quantidade aumentada em direção ao interior do concreto, de 5,1% na camada 1 para 19,1% na camada 3. Em comparação com o traço de referência correspondente (R75), o traço CV75 apresenta uma menor porcentagem de macroporos nas três profundidades estudadas, bem como um aumento na quantidade de mesoporos. O teor de poros com diâmetro menor que 10 nm no traço com cinza volante aumenta de forma mais acentuada à medida que aumenta a profundidade estudada. Isto mostra que, apesar da alta relação a/mc, a adição de cinza volante promove uma significativa redução no teor de mesoporos e macroporos no concreto, de 38% a 35% para poros entre 10 e 50 nm e de 57% para 56% para poros maiores que 50 nm, entre as camadas 1 e 3.

No traço CV40c (3º gráfico), assim como no CV40 sem cal, há significativa tendência de refinamento dos poros, devido ao efeito conjunto da baixa relação a/mc e da ação da cinza volante. Neste traço, o diâmetro de poros predominante também está entre 10 e 50 nm, cuja porcentagem varia de 43,5 % na camada 1 a 44,2% na camada 3, constatando-se que praticamente não há variação com a profundidade. Os poros com diâmetro maior que 50 nm somam aproximadamente 37% na camada mais superficial do concreto, decrescendo para 28% na camada 3. A cinza volante e a menor relação a/mc proporcionaram um aumento na quantidade de poros menores que 10 nm, em comparação com o traço de referência correspondente (R45) e esta porcentagem mostrou-se ligeiramente inferior ao do traço correspondente sem cal (CV40) para as três profundidades.

Manteve-se no traço CV75c a tendência observada no traço CV75, com predominância dos poros maiores de 50 nm sobre os demais, que

variaram de 49,5 % na camada 1 à 42,9 % na camada 3. Neste traço, os poros maiores que 10 nm tendem a diminuir com o aumento da profundidade, enquanto que os poros menores que 10 nm aumentam sua quantidade em direção ao interior do concreto.

Devido à relação a/mc mais elevada, na camada mais superficial do concreto, a porosidade relativa às duas maiores faixas de diâmetro corresponde à pouco menos de 50% da porosidade total. Observa-se que, na camada 1, nesta mistura há um teor muito menor de macroporos em comparação com os traços R75 (49,5% e 75%, respectivamente) e enquanto em relação ao CV75 a queda é menor (49,5% e 57%, respectivamente), fato que favorece a durabilidade. Aqui a explicação é a mesma anterior: o maior teor de cal favorece melhor cura superficial pela retenção de água. Observa-se também aqui uma forte tendência de refinamento dos poros menores que 10 nm à medida que a profundidade aumenta, variando de 8,2 % para mais do dobro, 19,7% na camada 3. Em comparação com o traço CV75, a adição de cal diminui o teor de macroporos nas três camadas, significando que a cal proporciona um aumento dos micro e mesoporos, ou seja, maior refinamento devido à maior formação de C-S-H secundário.

A Tabela 3, a seguir, apresenta os resultados do ensaio de porosidade por intrusão de mercúrio. Nesta tabela, pode-se ver que, apesar do concreto de referência apresentar a menor porosidade total de todos os demais, foi o que apresentou maior teor de poros com diâmetros superiores a 50 nm, o que bem revela a sua maior suscetibilidade de se deixar atravessar por fluidos do que os traços com cinza volante, com ou sem cal.

TABELA 3: Resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Traço/ Camada	$\Phi$ crítico nm	$\Phi < 10$ nm %	$10 < \Phi < 50$ nm %	$\Phi > 50$ nm %	Porosidade Total (%)
R40 1	97	16,0	13,4	72,6	7,6
R40 2	100	16,3	12,7	72,1	4,7
R40 3	73	17,4	28,8	54,5	2,1
R75 1	148	4,3	20,3	74,8	6,6
R75 2	136	6,8	18,7	74,1	9,7
R75 3	84	9,8	24,7	65,3	8,2
CV40 1	80	20,0	52,0	28,0	8,0
CV40 2	55	23,3	55,4	21,3	8,3
CV40 3	40	30,0	58,7	11,3	11,7
CV75 1	175	5,1	38,0	56,9	11,6
CV75 2	170	10,2	39,7	50,1	14,2
CV75 3	155	19,1	35,0	45,9	15,6
CV40c 1	90	19,8	43,5	36,7	16,8
CV40c 2	80	22,8	43,5	33,7	16,6
CV40c 3	70	28,0	44,2	27,8	16,7
CV75c 1	110	8,2	42,3	49,5	15,1
CV75c 2	90	13,0	40,1	46,9	15,4
CV75c 3	80	19,7	37,4	42,9	14,1

### 3.2.2. Discussão dos resultados dos ensaios de porosidade

Os resultados dos ensaios de porosimetria mostraram os benefícios da adição de cinza volante em altos teores na diminuição das dimensões dos poros, bem como da redução da relação a/mc para o mesmo fim.

O traço com cinza volante e sem cal demonstrou uma microestrutura mais densa do que o traço de referência principalmente na profundidade 1, camada mais superficial do concreto e mais débil, por sofrer com o aumento da relação a/mc, devido ao acúmulo de água na interface forma/concreto. De uma maneira geral, em todos os traços

houve um refinamento dos poros do concreto, à medida que aumentou a profundidade considerada.

No traço com cinza volante e cal, também houve um refinamento significativo da porosidade, 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 menores que 50 nm. Deve-se observar que a diminuição dos poros no traço com cal é de magnitude suficiente para garantir um bom desempenho do concreto quanto à permeabilidade de fluidos, lembrando que a adição da cal também fornece ao concreto maior teor de hidróxido de cálcio que pode resultar, em combinação com reação pozolânica da cinza volante, em fases adicionais de C-S-H em idades mais avançadas, além de melhor desempenho à carbonatação.

Os resultados mostram que é benéfico aumentar não só o teor da adição pozolânica, mas também a resistência do concreto, através da diminuição da relação  $a/mc$ , pois assim o efeito de tais medidas na redução da porosidade será potencializado (efeito duplo). A adição de cal hidratada juntamente com a cinza volante é mais benéfica nos concretos convencionais e provê maior reserva alcalina contra a carbonatação, apesar de apresentar poros na faixa inferior a 50 nm ligeiramente superior aos traços sem cal. Para os concretos de alto desempenho somente a adição de cinza volante traz maior compacidade na camada de cobrimento.

### **3.3 Análise dos dados de Água Combinada**

Foram analisados dados referentes aos ensaios de água combinada para cada uma das três camadas nas duas relações água/materiais cimentícios ( $a/mc$ ).

Água quimicamente combinada, conforme definição de Campiteli (1987), é a água que se combina com o cimento não hidratado nas reações de hidratação e a qual faz parte integrante dos produtos sólidos.

### 3.3.1 Análise em igualdade de relação a/mc

Os resultados obtidos nos ensaios de água combinada estão apresentados na Tabela 4.

TABELA 4: Teores de água combinada em cada traço

TRAÇOS/CAMADA	TEOR DE ÁGUA COMBINADA (%)
R40/ 1	3,97
R40/ 2	3,20
R40/ 3	2,85
R75/ 1	3,01
R75/ 2	3,33
R75/ 3	3,42
CV40/ 1	3,50
CV40/ 2	3,17
CV40/ 3	3,09
CV75/ 1	2,70
CV75/ 2	2,87
CV75/ 3	3,16
CV40c/ 1	6,15
CV40c/ 2	6,26
CV40c/ 3	6,90
CV75c/ 1	2,11
CV72c/ 2	4,60
CV75c/ 3	4,87

A Figura 29 apresenta graficamente o teor de água combinada em cada traço para a/mc de 0,40.

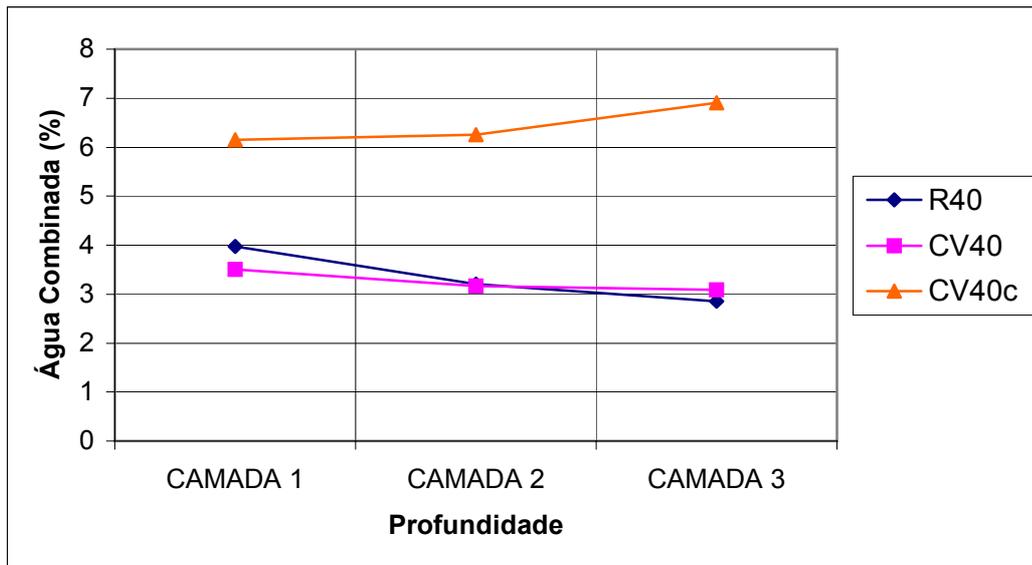


FIGURA 29: Teor de água combinada em cada traço para a/mc de 0,40.

Observa-se que, para os traços de referência e com cinza volante sem cal, na relação a/mc mais baixa (0,40), houve um decréscimo no teor de água combinada com o aumento da profundidade estudada. Para o traço de referência, esta diminuição foi de 1,1% da camada 1 para a camada 3 e para o traço com cinza volante sem cal, de 0,4%, ou seja, praticamente constante.

Tomando a camada 1 como referência, para os traços R40 e CV40, houve uma diminuição de 0,77% e 0,33%, respectivamente, ao aumentar-se a profundidade considerada para a camada 2 e daí para a terceira camada, o decréscimo observado foi de 0,35% e 0,08%, respectivamente. Tais resultados mostram diferenças muito tênues no teor de água combinada em cada camada, demonstrando apenas uma leve tendência de decréscimo na quantidade de produtos da hidratação com o aumento da profundidade.

Considerando os resultados obtidos nos ensaios de dimensão dos poros, observa-se que a quantidade de poros de diâmetros maiores que 50 nm na camada mais superficial do concreto para os traços de relação a/mc 0,4 é menor que a quantidade destes poros nos traços de a/mc de

0,75 (-3% para o traço de referência, -30% para o traço com CV sem cal e -13% no traço com CV e cal), bem como os diâmetros críticos para a relação a/mc mais baixa também são menores. Com isso, pode-se afirmar que a porosidade da camada 1 dos traços com a/mc de 0,40 é menor, proporcionando trocas de umidade entre o ambiente e o interior do concreto em níveis mais baixos.

Dessa forma, provavelmente a segunda e a terceira camada estudadas tiveram, durante o período de cura, menos contato com a água proveniente do exterior, formando menos produtos de hidratação nestas camadas em relação à camada 1, o que explica o leve decréscimo do teor de água combinada com o aumento da profundidade. Note-se ainda que no traço com cinza volante sem cal, 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. Apesar de serem teores praticamente iguais, a pequena diferença pode ser devido ao fato de que o traço com cinza volante tem apenas a metade da quantidade de cimento do traço de referência, de modo que as reações pozolânicas não foram suficientes para recompor o mesmo teor de C-S-H deste último.

O traço CV40c, 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 0,11%) e 6,9% 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.

As prováveis causas deste comportamento são: a) adição externa de 20% de cal hidratada, além daquela interna proveniente das reações da hidratação, disponibilizando mais CH para nucleação e formação de maior teor de C-S-H secundário; b) a retenção de água proporcionada

pela cal adicionada é fonte interna de cura e, logo, de maior disponibilidade de água para as reações de hidratação; c) as duas causas anteriores somadas com a nucleação mais elevada causada pela cinza volante em relação aos grãos de cimento, oportunizando maior hidratação do mesmo.

O gráfico da Figura 30 mostra o teor de água combinada em todos os traços para a/mc de 0,75.

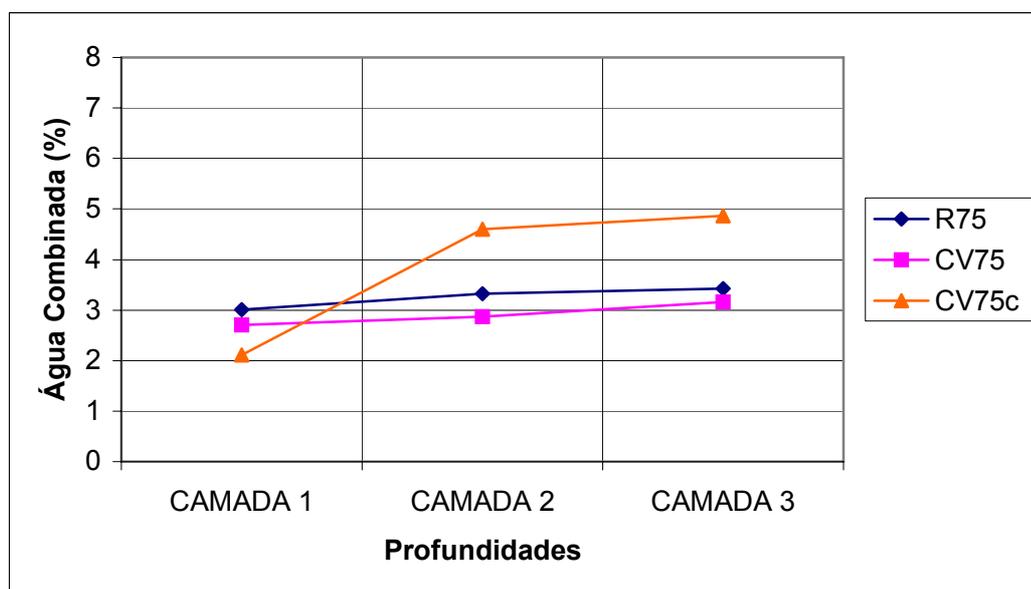


FIGURA 30: Teor de água combinada em todos os traços para a/mc de 0,75.

Para a relação a/mc de 0,75 observou-se um pequeno aumento no teor de água combinada com o aumento da profundidade, comportamento contrário aos do concreto de referência e CV40 analisados anteriormente.

O traço de referência apresentou acréscimos no teor de água combinada de 0,32% da camada 1 para a camada 2 e de 0,09% da segunda para a terceira camada. Considerando a pequena variação, pode-se sugerir uma constância no teor de água combinada nas três camadas estudadas. Em relação à R40, o traço R75 apresenta valores de

água combinada 1,3 vezes *menor* na primeira camada, 1,04 vezes *maior* na segunda e 1,2 vezes *maior* na terceira.

As prováveis causas destes comportamentos são: na camada 1, o efeito da evaporação da água pela maior dimensão dos poros e, nas camadas 2 e 3, a maior disponibilidade de espaço para formação de C-S-H). Há que se considerar também que no traço de referência há maior disponibilidade de cimento Portland (clínquer) para a hidratação.

Para o traço com cinza volante sem cal, observaram-se aumentos de 0,17% da primeira para a segunda camada e de 0,29% da segunda para a terceira camada, comportamento similar ao de referência e contrários aos da relação  $a/mc = 0,40$ . Neste traço, devido às pequenas diferenças, também pode-se considerar uma constância no teor de água combinada nas três camadas.

Os teores de água combinada de CV75 e CV40 em todas as camadas estudadas mostraram-se praticamente iguais, com diferenças muito pequenas e portanto sem significância.

Para o traço com cinza volante e cal, o teor de água combinada observado na camada 1 foi o menor de todos os traços (2,11%), mostrando que para relação  $a/mc$  mais alta (maior diâmetro crítico e conectividade), 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.

Entretanto, 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%. Em comparação com o traço CV40c, 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).

### 3.3.2 Análise conjunta dos resultados em igualdade de relação a/mc

Os gráficos da Figura 31 apresentam o teor de água combinada em cada camada para todos os traços pesquisados.

A análise dos gráficos indica que, para os dois primeiros, houve um comportamento muito similar, com diferenças pouco significativas entre os traços R40 CV40, R75 e CV75, com teores de água combinada ao redor de 3 e 4%.

Houve uma leve tendência de decréscimo da água combinada nos traços de relação a/mc de 0,40, à medida que aumenta a profundidade, provavelmente devido à menor permeabilidade destes traços. Para os traços mais permeáveis (a/mc = 0,75), ao contrário, observou-se uma leve tendência de aumento no teor de água combinada devido, justamente, à porosidade mais aberta destes traços junto à superfície, proporcionando maior troca de umidade com o ambiente. As diferenças observadas não são significativas entre as relações a/mc 0,40 e 0,75 de cada traço.

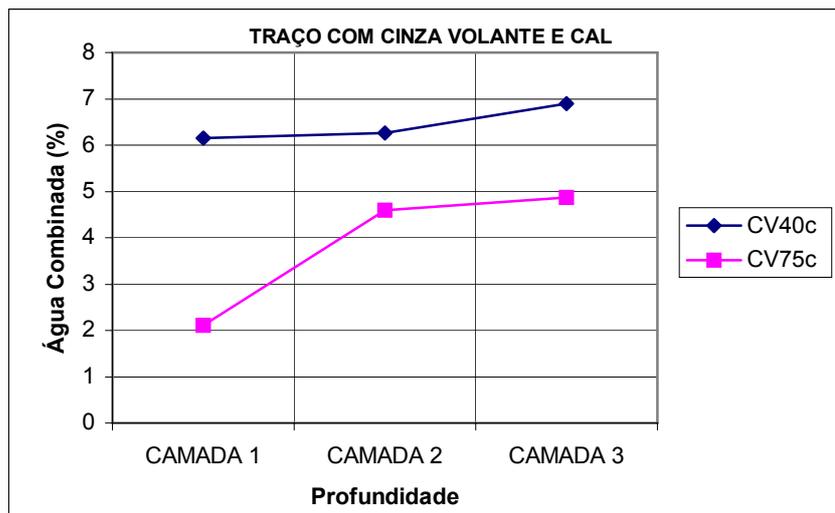
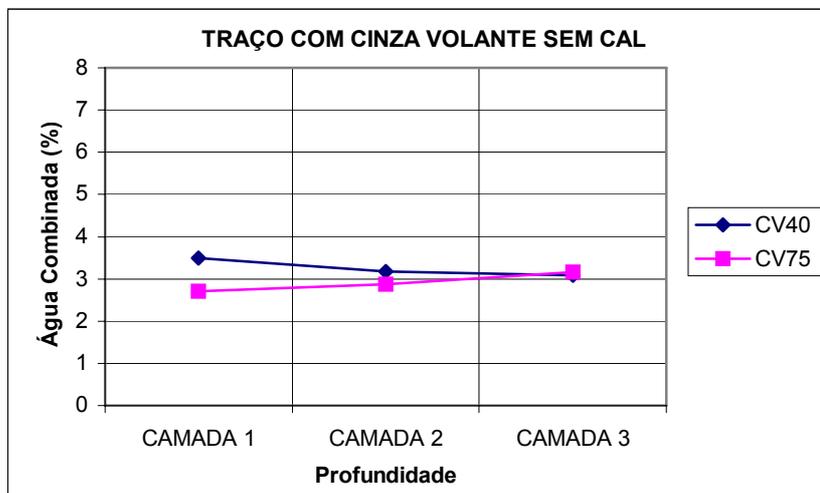
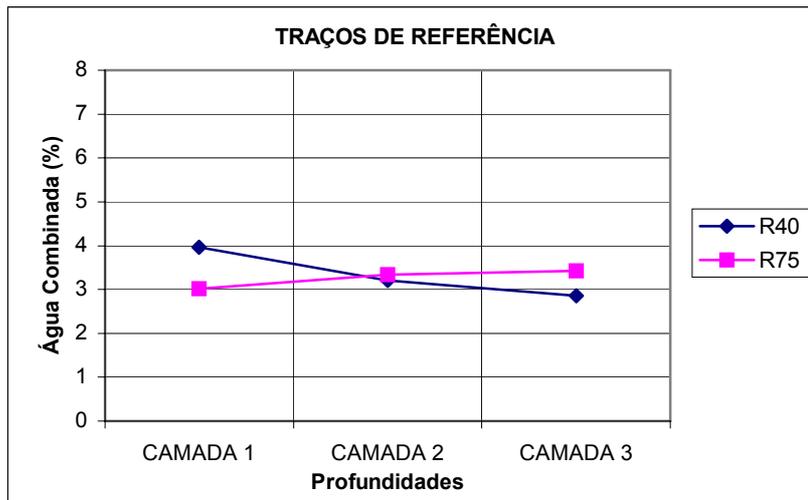


FIGURA 31: Teor de água combinada em cada camada dos traços.

Para o traço com cal, o comportamento observado foi bastante diferente dos dois anteriores, com teores de água combinada em níveis muito acima, com exceção da camada 1 da  $a/mc = 0,75$ , cujo teor de água combinada foi o mais baixo observado (2,11%). Houve um sensível acréscimo de água combinada da camada 1 para 3 para a relação  $a/mc = 0,40$  (+0,75%) e um aumento mais significativo na relação 0,75 (+2,76%).

Observou-se diferenças muito significativas entre os teores obtidos para  $a/mc = 0,40$ , entre 6 e 7%, e  $a/mc = 0,75$ , entre 2 e 5%. Portanto, o maior acréscimo observado foi para o traço com cal e relação  $a/mc = 0,40$  em relação ao traço R40 na terceira camada (1,42 vezes maior) ao CV40 nesta mesma camada (2,23 vezes maior). Isto deve-se a menor permeabilidade dos traços 0,40, conforme já exposto, aliado a maior reserva de CH e retenção de água proporcionado à CV40c pela adição de cal.

No gráfico da Figura 32 apresenta-se o teor de água combinada em cada camada.

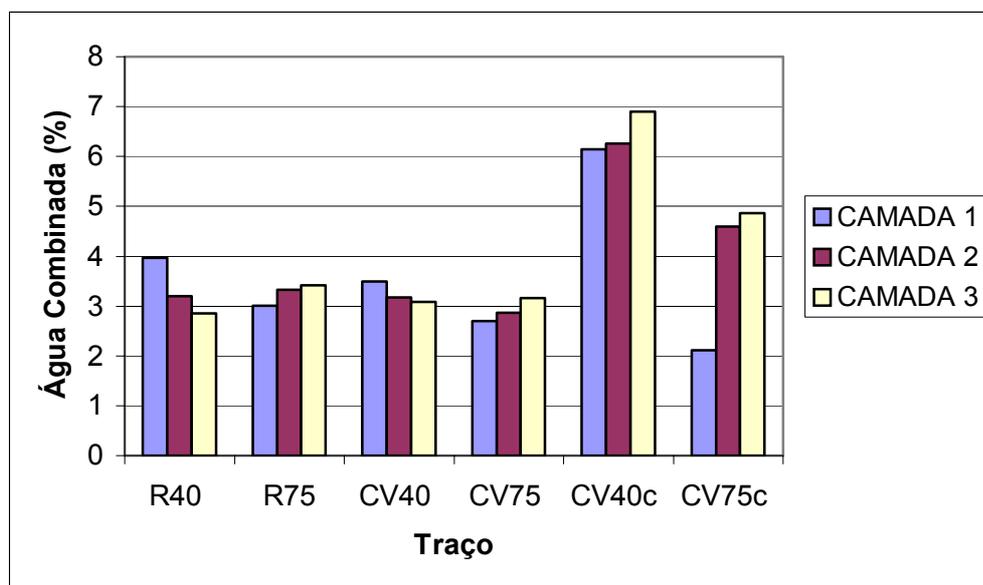


FIGURA 32: Teor de água combinada em cada camada.

Percebe-se que os traços com cinza volante e cal (CV40c e CV75c) têm um teor de água combinada superior aos traços sem cal (R40, R75, CV40 e CV75), principalmente nas camadas 2 e 3. Pela inclinação das retas referentes aos traços com cal, nota-se que a taxa de aumento do teor de água combinada de uma camada para outra é significativamente superior às dos demais traços. Tais comportamentos devem-se, em grande parte, à retenção de água promovida pela cal, garantindo uma reserva de umidade para a hidratação do sistema, bem como o maior teor de hidróxido de cálcio promovido por esta adição em comparação com os traços sem cal, para a formação de C-S-H suplementar. As variações observadas no traço de referência e com cinza volante sem cal para  $a/mc = 0,4$  são bastante tênues, proporcionadas pela relativa baixa permeabilidade da pasta nesta relação  $a/mc$ . Nos traços R75 e CV75, o sensível aumento do teor de água combinada é devido ao maior teor de água e conseqüente maior dimensão dos poros.

### **3.4 Análise das micrografias do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura**

As fotografias obtidas nos ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) são analisadas apenas qualitativamente, a partir da morfologia dos compostos observados, embasado em bibliografia sobre o tema. É importante lembrar que o ensaio de MEV é pontual e não revela a microestrutura do concreto como um todo, mas apenas um local específico.

Diamond & Ravina (1980) afirmam que ao se analisar 10 micrografias de um mesmo local com  $1 \text{ cm}^2$ , obtém-se somente uma amostra de 0,001% da superfície de estudo.

Para a análise da microestrutura do concreto através de MEV, foram realizadas várias micrografias de cada traço, totalizando 72 fotografias, tendo sido escolhidas as mais representativas das camadas 1 e 3, e, eventualmente da camada 2, para mostrar as possíveis mudanças devido à profundidade bem como à presença de cinza volante e/ou cal hidratada.

A Figura 33, com uma ampliação de 1500 vezes, refere-se à amostra da camada 1 do traço de referência com relação a/mc de 0,45 que apresentou uma superfície granular relativamente compacta mas não muito homogênea. Percebem-se, na micrografia, cristais de hidróxido de cálcio bem conformado e grânulos de C-S-H.

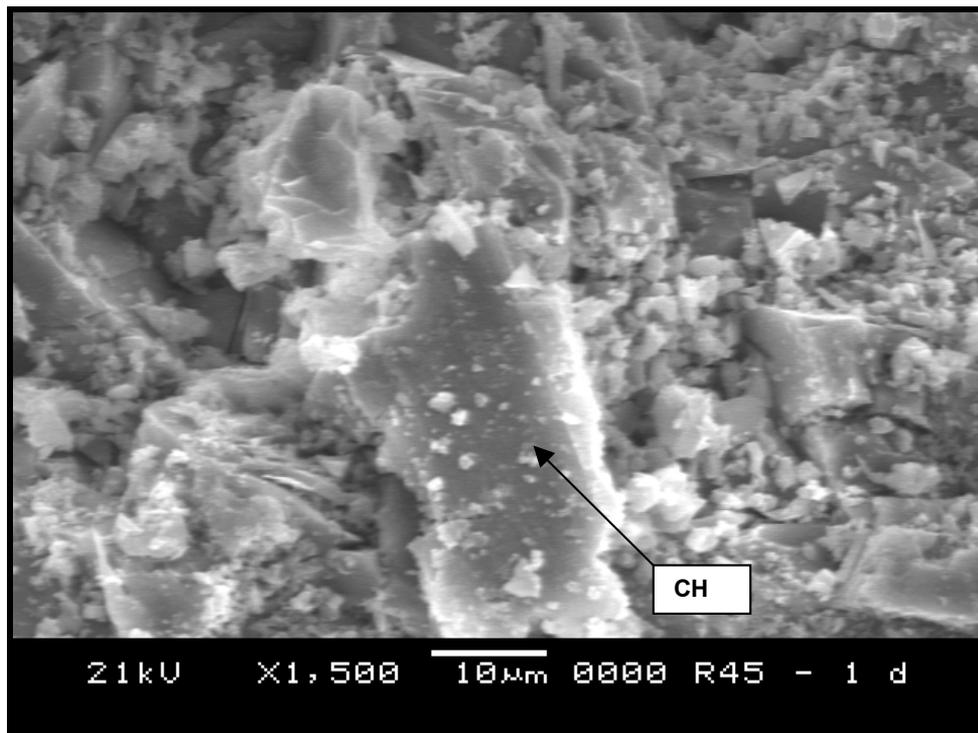


FIGURA 33: Superfície de amostra da camada 1 do traço R45 ampliada 1500 X.

Na micrografia da amostra da camada 3, a mais interna estudada, do traço de referência e  $a/mc = 0,45$ , percebe-se em primeiro plano na Figura 34, um cristal de hidróxido de cálcio bem formado, sobre uma superfície granular. Conforme visto na análise de porosidade, a camada 3 é menos permeável do que a camada 1, o que pode ser verificado nesta figura onde a superfície é mais compacta que a da camada mais superficial do protótipo. Esta compactidade maior deve-se também à relação  $a/mc$  mais baixa deste traço.

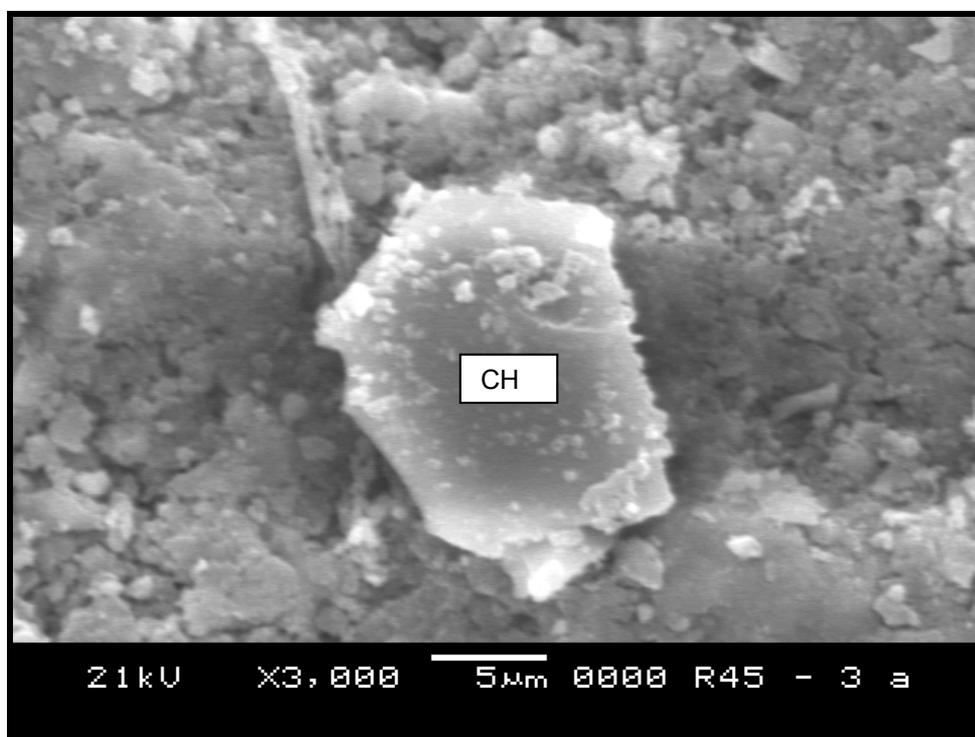


FIGURA 34: Superfície de amostra da camada 3 do traço R45 ampliada 3000 X.

A superfície da amostra do traço de referência na relação  $a/mc$  de 0,80 (na Figura 35 ampliada 3000 vezes) apresentou-se irregular e com poros maiores, entre 5 e 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro (5,59  $\mu\text{m}$  em destaque na figura). Tais poros, segundo Mindess & Young (1981), classificam-se

como um poros capilares grandes, ou seja, dentro da faixa de 0,5 à 10  $\mu\text{m}$ . Tal porosidade tem influência bastante grande na permeabilidade total do material e, considerando tratar-se da camada mais superficial do concreto, na durabilidade da estrutura. No canto superior esquerdo da micrografia aparecem cristais de CH de menores dimensões, cercados por produtos de hidratação.

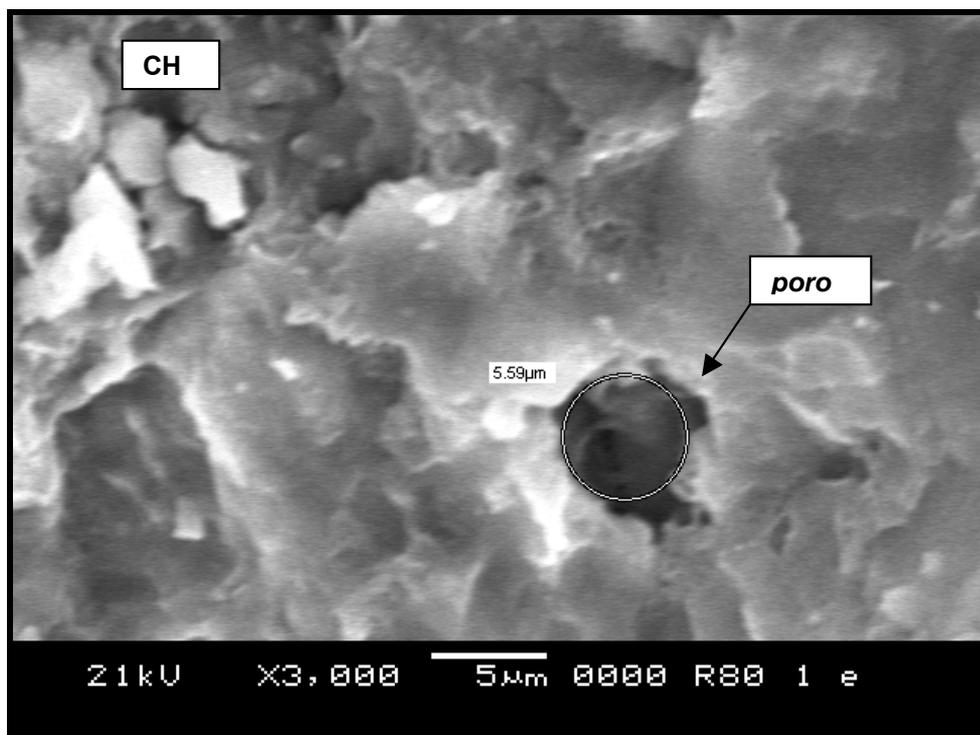


FIGURA 35: Superfície de amostra da camada 1 do traço R80 ampliada 3000 X.

A camada 3 do traço R80 mostrou, como pode ser observado na Figura 36, uma superfície granular com maior quantidade de vazios, cujas dimensões chegam à 7,5  $\mu\text{m}$ , ou seja, poro capilar grande, de acordo com Mindess & Young (1981). Percebe-se, portanto, que a alta relação  $a/mc$  promoveu o surgimento de poros nesta faixa mesmo na camada mais

interna de estudo. Podem ser observados na micrografia cristais de CH e tufos de C-S-H.



FIGURA 36: Superfície de amostra da camada 3 do traço R80 ampliada 2700 X.

Na Figura 37, com ampliação de 3000 vezes, o traço CV40, camada 1, apresentou fissuras ao redor de grãos de CV, que, conforme descrito por Montgomery & Diamond (1984) são devidas a menor adesão existente entre os grãos da cinza volante e o hidróxido de cálcio situado ao seu redor.

As fissuras, no entanto são relativamente pequenas (da ordem de 1 a 2 µm) . A fissura mostrada no destaque tem, em sua maior dimensão, cerca de 4,45 µm de extensão.

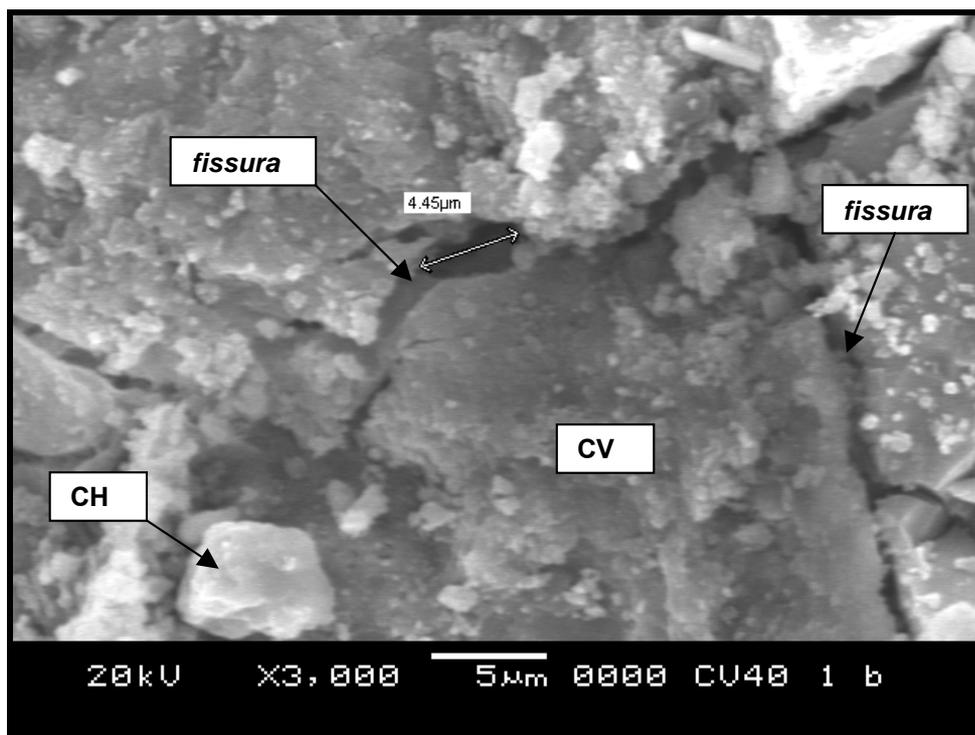


FIGURA 37: Superfície de amostra da camada 1 do traço CV40 ampliada 3000 X.

Na camada 3 de CV40, aparecem agulhas de C-S-H ou etringita e vazios com dimensões entre 1 e 5  $\mu\text{m}$ . O poro no destaque insere-se na faixa de poros capilares grandes, apesar da profundidade considerada (camada 3) e da relação  $a/mc$  de 0,40.

De acordo com Goñi *et al.* (1998), o C-S-H em forma de agulhas aparece entre as partículas de cinza volante ou sobre elas, densificando o material e diminuindo sua porosidade.

Esta afirmação confirma-se aqui, visto que tal morfologia do silicato de cálcio hidratado só aparece na camada 3 (Figura 38), a mais interna das amostras estudadas.

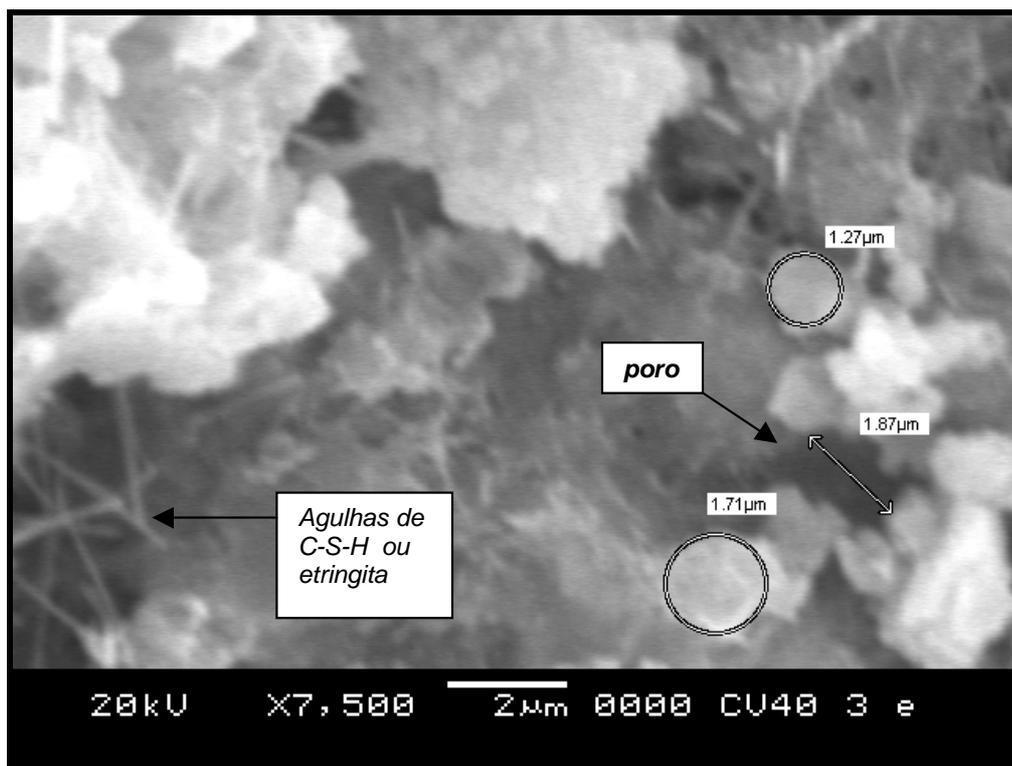


FIGURA 38: Superfície de amostra da camada 3 do traço CV40 ampliada 7500 X.

A amostra da camada 1 de CV75 (Figura 39) mostra, em sua superfície, uma fissura contornando agregado. Tal fissura pode ser decorrente da retração à qual a superfície do concreto é mais suscetível durante o processo de secagem e cura. Não pode ser descartada, porém, a possibilidade de tais fissuras resultarem de choques mecânicos durante a preparação da amostra. Pode-se perceber também vazios com até 18 μm devido a maior relação a/mc e produtos da hidratação sobre a superfície do agregado.

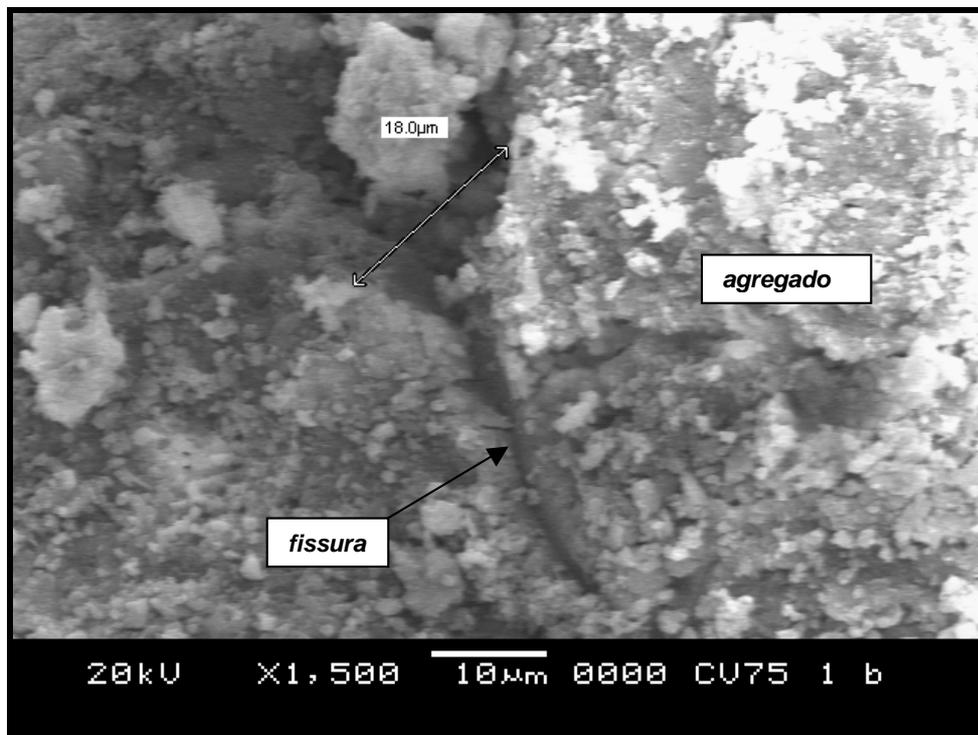


FIGURA 39: Superfície de amostra da camada 1 do traço CV75 ampliada 1500 X.

A superfície da amostra da camada 3 de CV75 na micrografia da Figura 40, ampliada 1500 vezes, mostrou-se bastante heterogênea (assim como a camada 1), com muitos poros. No destaque, observa-se um poro cuja maior dimensão tem 14,3  $\mu\text{m}$  e outros poros com dimensões menores. Em toda a área mostrada pela micrografia há produtos da hidratação (em destaque). No canto superior esquerdo, pode-se observar a superfície de uma partícula de CV e, sobre ela, depositados produtos da hidratação.

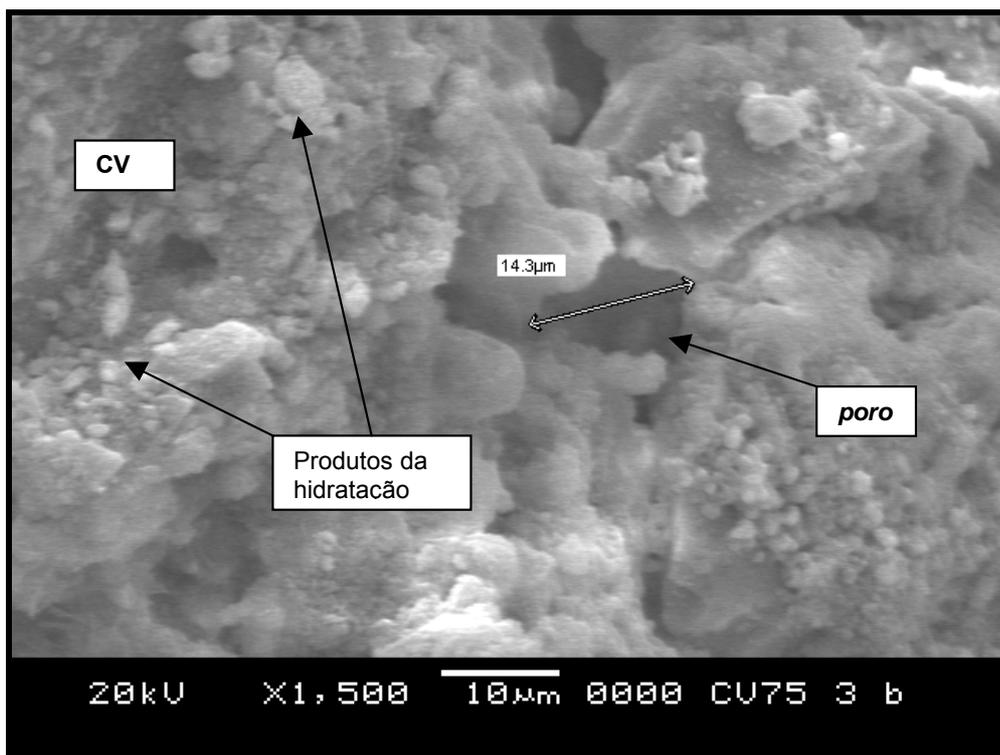


FIGURA 40: Superfície de amostra da camada 3 do traço CV75 ampliada 1500 X.

Em primeiro plano na Figura 41, em destaque, observa-se na superfície da amostra da camada 1 de CV40c um poro com diâmetro de 23,5  $\mu\text{m}$  no centro.

A princípio, tal poro, cujas dimensões são relativamente grandes, não parece estar conectado com outros poros de dimensões semelhantes, o que leva a crer que, provavelmente, por estar junto à superfície, seja oriundo de uma falha em contato com a forma.

Em seu interior, nota-se a presença de cristais de hidróxido de cálcio. Abaixo, à direita, pode-se distinguir um cristal de CH bem formado.

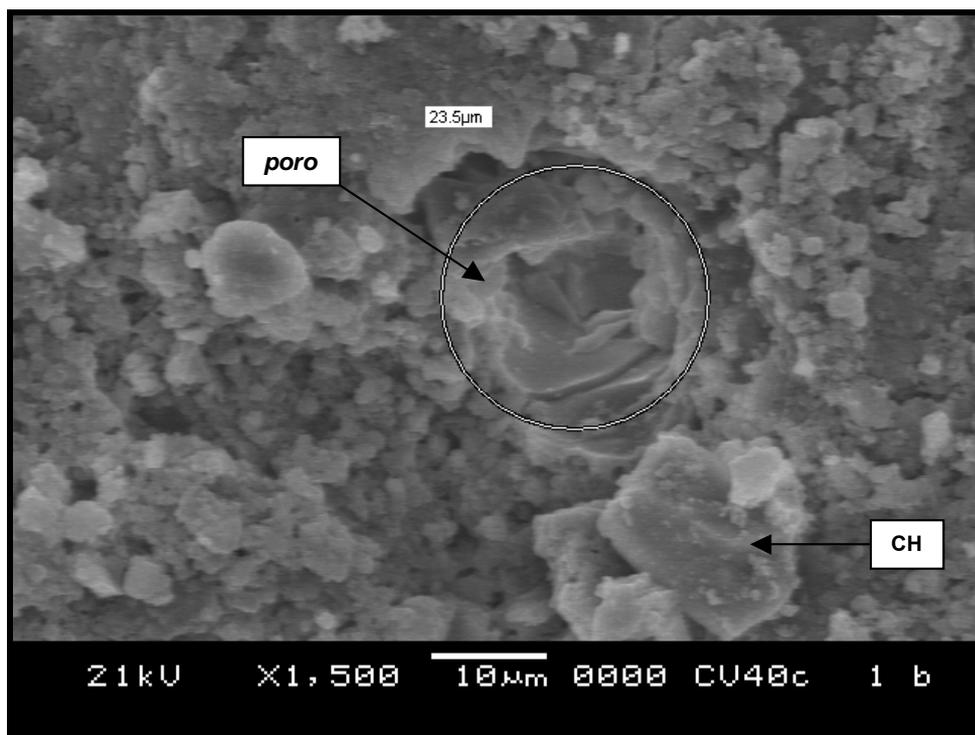


FIGURA 41: Superfície de amostra da camada 1 do traço CV40c ampliada 1500 X.

A superfície da amostra da camada 2 de CV40c mostra agulhas de C-S-H à esquerda. A estrutura de cor clara ao centro e direita é C-S-H do tipo 2, em forma de agulhas (Tenoutasse & Marion, 1986). Na parte inferior ao centro, observa-se uma partícula de CV com poros em sua superfície. Segundo estes mesmos autores, mesmo após dois anos de hidratação do concreto, ainda pode haver partículas de cinza volante intactas. Isto se deve à distribuição não homogênea dos componentes químicos nas partículas de CV, causado pelos processos de queima e resfriamento à qual a cinza foi submetida. Ainda, de acordo com os mesmos, a reação pozolânica começa a ocorrer na forma de erosão da fase vítrea das partículas de CV. Com a reação em curso, começam a aparecer macroporos na superfície da partícula de cinza volante, conforme pode ser observado na Figura 42.

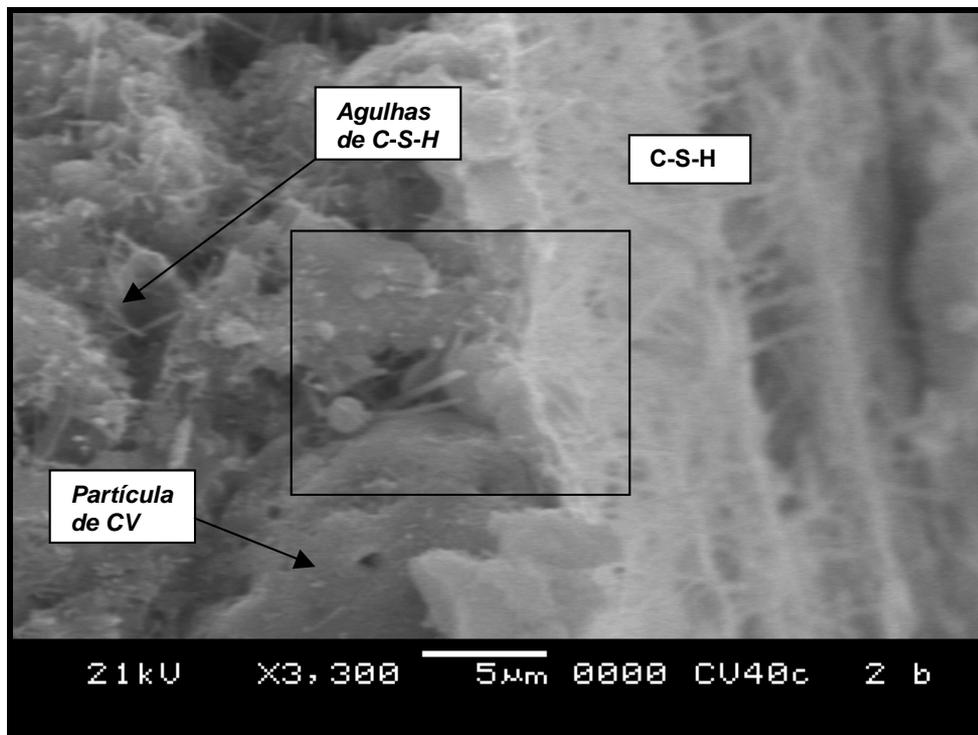


FIGURA 42: Superfície de amostra da camada 2 do traço CV40c ampliada 3300 X.

Montgomery *et al.* (1981) relatam três etapas do processo da reação pozolânica:

- 1) *Encapsulamento* (ver detalhe ampliado na Figura 43): O hidróxido de cálcio em misturas com pozolanas apresenta uma morfologia diferente daquela observada em uma pasta apenas com cimento Portland. Aqui, o CH reage com a cinza volante;
- 2) *Nucleação*: agulhas de C-S-H envolvem a partícula de CV. Ocorre a formação de “*filmes duplex*” ao redor da partícula de cinza volante, conforme relatado por Diamond *et al.* (1980). Estes filmes consistem de uma camada contínua e fina (cerca de 0,5 μm) de hidróxido de cálcio que se deposita na superfície

exposta e ainda uma camada fina de partículas de gel de C-S-H.

- 3) *Modificações físicas na partícula de CV*: ocorrem mudanças na superfície da partícula de CV que se torna relativamente lisa ou coberta de produtos da hidratação.

A área selecionada no retângulo aparece ampliada na Figura 43.

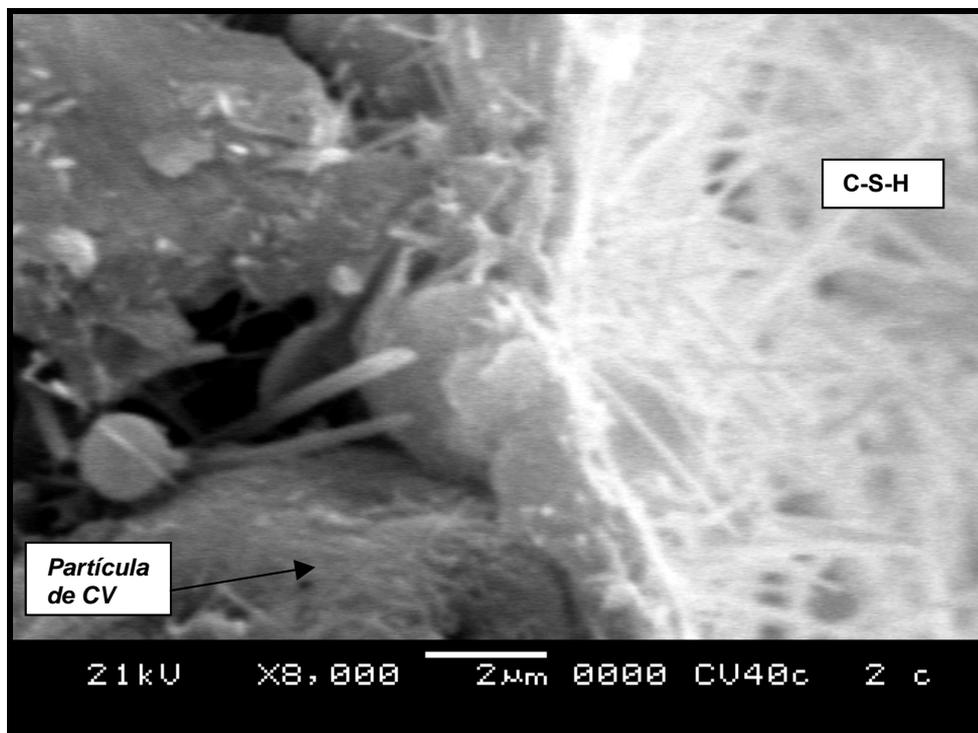


FIGURA 43: Superfície de amostra da camada 2 do traço CV40c ampliada 8000 X.

A Figura 43 mostra a ampliação de uma área limitada da figura anterior. Partícula de CV encapsulada. Percebe-se que a partícula de cinza volante aparece em contato direto com uma camada de C-S-H em forma de agulhas, de acordo, portanto, com a afirmação de Goñi *et al.* (1998), já citada.

Em primeiro plano na Figura 44, com uma ampliação de 5500 vezes, na superfície da amostra da camada 3 de CV40c, aparece uma fissura de 1,72  $\mu\text{m}$  de espessura entre as partículas de CV. Sobre toda a superfície destas partículas, observa-se agulhas de C-S-H aleatoriamente distribuídas.

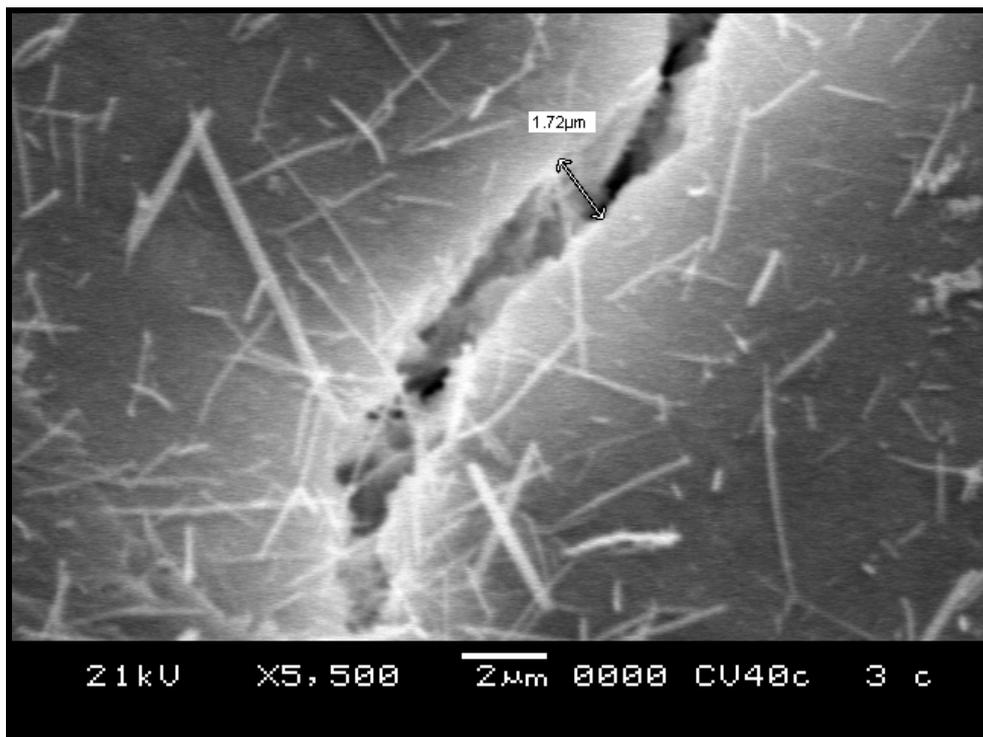


FIGURA 44: Superfície de amostra da camada 3 do traço CV40c ampliada 5500 X.

No traço CV75c, camada 1, observa-se, no destaque na Figura 45, uma fissura de 4,77  $\mu\text{m}$  de abertura contornando uma partícula de CV não hidratada. Sobre esta partícula, estão depositados produtos da hidratação.

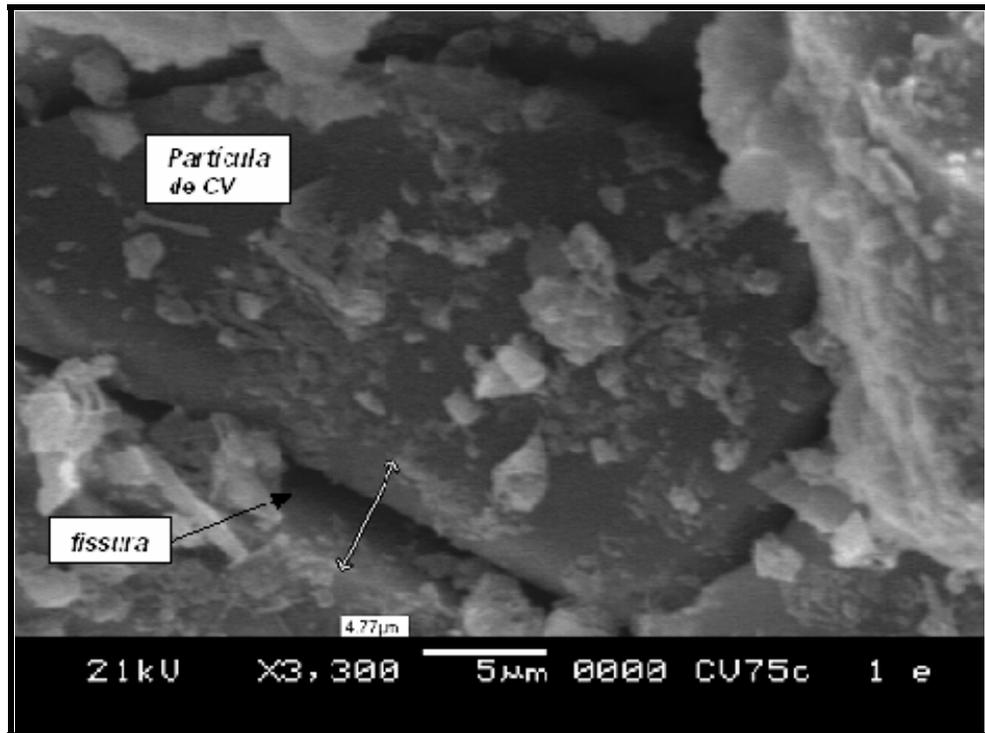


FIGURA 45: Superfície de amostra da camada 1 do traço CV75c ampliada 3300 X.

A superfície da camada 3 de CV75c mostra-se granular, mais ou menos porosa e relativamente homogênea, apresentando algumas fissuras. Nota-se nesta micrografia (Figura 46) a maior quantidade de produtos de hidratação devido a maior disponibilidade de espaço, por se tratar de relação  $a/mc = 0,75$ , como também pela adição de cal hidratada que disponibilizou maior quantidade de CH para as reações pozolânicas e formação de C-S-H secundário.

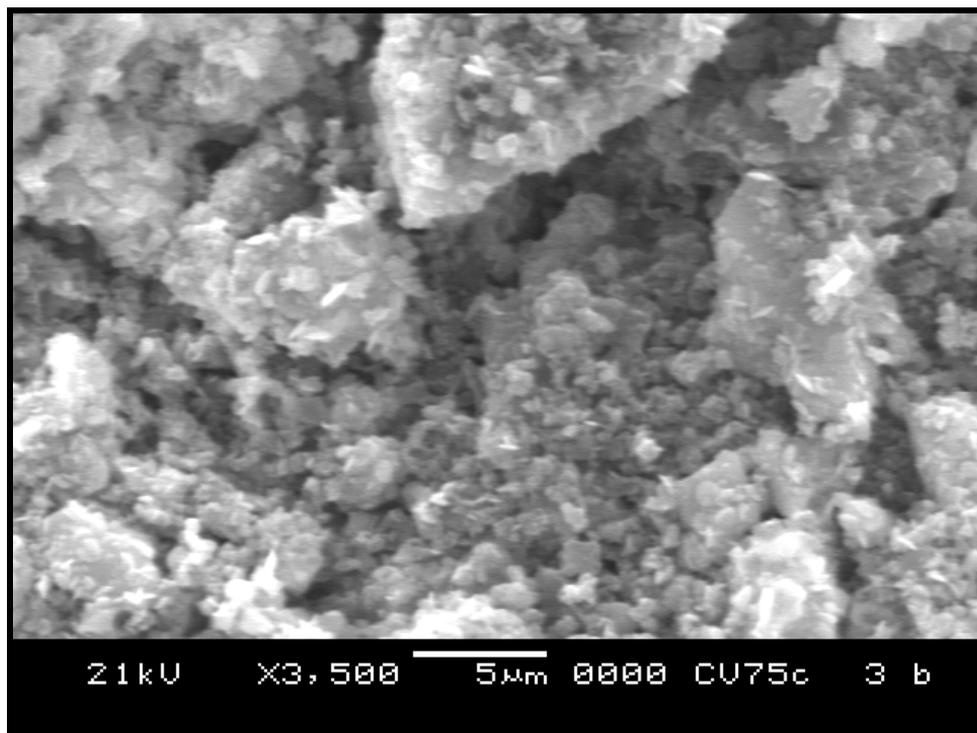


FIGURA 46: Superfície de amostra da camada 3 do traço CV75c ampliada 3500 X.

#### 3.4.1 Análise geral das micrografias

Observando as características morfológicas dos compostos que aparecem nas micrografias deste estudo, ficou evidenciado que:

- a) no concreto de referência os cristais de CH aparecem mais nitidamente conformados do que nas misturas com CV, o que é lógico, visto que nos traços com a pozolana, o hidróxido de cálcio é consumido pelas reações pozolânicas;
- b) na camada 1, mais superficial, as aberturas das fissuras e dimensões dos vazios foram maiores do que aqueles observados na camada 3, conforme classificação de Mindess & Young (1981);
- c) a formação de filme duplex ao redor das partículas de CV, segundo Tenoutasse & Marion (1986), foram observadas nas

camadas mais profundas das misturas CV40 e CV40c, ou seja, somente na relação a/mc mais baixa e nas camadas 2 e 3. Tal fato sugere que o C-S-H do tipo 2 ( $\alpha$  C-S-H) oriundo das relações pozolânicas ocorre em locais com menor porosidade, enquanto que, quando existe mais espaço, como na camada 1 ou na relação a/mc = 0,75, o C-S-H formado possui formato de um conglomerado caracterizado por crescimento epitáxico ( $\beta$  C-S-H, TAYLOR, 1997).

- d) Também ficou evidente que nas misturas com 50% de cinza volante, com ou sem cal, apareceram fissuras ao redor dos grãos da pozolana, tão maiores quanto mais elevada foi a relação a/mc, conforme apontado anteriormente por Montgomery & Diamond (1984).

Em suma, podemos afirmar que, apesar da microscopia eletrônica de varredura ser uma análise pontual e qualitativa, é uma ferramenta de extrema utilidade para comprovar tendências mostradas pelos resultados numéricos ou analíticos.

## **CAPÍTULO IV**

# **CONCLUSÃO**

Este trabalho teve por finalidade contribuir com a tecnologia do concreto, lançando um pouco de luz sobre um elemento ainda pouco estudado das estruturas de concreto armado: a camada de cobertura da armadura. Inevitável falar sobre durabilidade ou desempenho de estruturas de concreto sem devotar a devida atenção à primeira barreira física do concreto contra agentes agressivos. Verificou-se, de maneira quantitativa, através de ensaios de porosidade e água combinada, e qualitativa, por meio de MEV, as diferenças microestruturais entre o concreto da superfície e do interior de peças estruturais, bem como a influência da adição de cinza volante ao concreto, visando melhorar suas características. Através de ensaios com testemunhos e corpos de prova moldados e curados sob condições controladas, procurou-se fazer um paralelo entre a resistência à compressão testada em laboratório e a extração de testemunhos de protótipos curados em ambiente natural, com o propósito de aproximar os resultados da realidade observada *in loco* em obras civis.

### **4.1 Resistência à Compressão**

Observou-se que a adição de cinza volante ao concreto promove um retardamento do desenvolvimento da resistência à compressão aos 28 dias. Na idade de 91 dias, para todas as relações  $a/mc$ , o traço de referência, sem adições ou substituições, demonstrou resistências superiores aos traços com cinza volante: em média, 40% para  $a/mc=0,40$ , 32% para  $a/mc=0,55$  e 47% para  $a/mc=0,75$ . Analisando-se os dados de resistência à compressão de 28 e 91 dias, a resistência dos

concretos com cinza volante mostrou evolução mais acentuada: em torno de 24% para  $a/mc=0,4$ , 26% para  $a/mc=0,55$  e 36% para  $a/mc=0,75$ , em média. Aos 91 dias, a diferença de resistências entre os traços de referência e os traços com CV diminuiu significativamente, para os traços com menor  $a/mc$ , em comparação com os dados de 28 dias.

Constatou-se o aumento da resistência à compressão com a diminuição do fator  $a/mc$ , sendo que o traço de referência mostrou-se mais sensível à diminuição no teor de água na mistura. Para a relação  $a/mc$  mais alta, de 0,75, as resistências à compressão mais baixas registradas foram dos testemunhos extraídos do traço com cinza volante sem cal, mostrando que, para relações  $a/mc$  mais altas, a cura ao ar livre não fornece umidade suficiente para garantir a devida hidratação do concreto.

Constatou-se pela análise dos resultados aos 91 dias, que, para as relações  $a/mc$  mais baixas (0,40 e 0,55), os testemunhos extraídos dos protótipos curados ao ar livre do traço de referência apresentaram resistências à compressão superiores (em média 12%) àquelas verificadas nos corpos de prova moldados e curados em câmara úmida. Os testemunhos dos traços com cinza volante sem cal, porém, demonstraram resistências inferiores aos CPs.

Deve ser destacado a influência benéfica da adição de cal no concreto fresco, principalmente pelo fato de tal adição promover maior reserva de umidade para a cura do concreto, através da retenção de água. Aos 91 dias, os traços com cinza volante e cal apresentaram resistências um pouco maiores do que os traços com cinza volante sem cal, principalmente nos traços com menor  $a/mc$ . Isto deve-se ao maior teor de hidróxido de cálcio proporcionado ao concreto por esta adição, para as reações pozolânicas, bem como pela retenção de água por parte da cal, conforme já exposto.

Tendo em vista que as reações pozolânicas continuam ocorrendo no concreto mesmo após o período de cura, supõe-se que o maior teor de

CH conferido pela cal proporcione, em idades mais avançadas, a formação de fases adicionais de C-S-H do que o concreto de referência ou o concreto com CV sem cal.

#### **4.2 Distribuição das dimensões dos poros**

Os dois traços com CV, com e sem cal, apresentaram uma microestrutura mais densa do que o traço de referência, para todas as relações a/mc pesquisadas.

Os traços com cinza volante com e sem cal apresentaram, entre si, resultados semelhantes no tamanho e distribuição dos poros nas três camadas estudadas.

Os traços com cinza volante tiveram maior refinamento dos poros, pois ficou constatado que o teor de poros com diâmetros inferiores a 10 nm na primeira camada de a/mc=0,40 foi 4% maior que o observado no traço de referência. Essa diferença aumentou para 7% e 12% nas camadas 2 e 3, respectivamente.

Para a/mc=0,75, as diferenças mostraram-se menores: CV75 apresentou teores de poros menores que 10 nm da ordem de 1%, 3% e 9% maiores que a referência nas camadas 1, 2 e 3, respectivamente.

Constatou-se, portanto, que, em geral, a dimensão dos poros do concreto diminui com a redução do fator a/mc e com a adição de cinza volante.

A camada mais superficial do concreto apresentou poros de maior dimensão do que as camadas mais interiores, ou seja, a superfície do concreto, devido ao efeito parede entre forma e concreto, possui poros de maiores dimensões do que o interior. Verificou-se que o tamanho dos poros do concreto diminui com o aumento da profundidade considerada, conforme já constatado pela literatura.

Os dados expostos nesta pesquisa evidenciaram que há a necessidade de melhorar a qualidade da camada de cobertura do

concreto. Para isto, sugere-se o uso de pozolanas e um aumento de resistência, através da diminuição da relação  $a/mc$ , gerando assim um efeito duplo, com intenção de tornar mais densas as camadas mais superficiais do concreto.

### **4.3 Teor de água combinada**

Constatou-se que o teor de água combinada no concreto sofre influência da cura e da profundidade em relação à superfície. De um modo geral, as variações observadas nesta pesquisa para o teor de água combinada mostraram-se bastante tênues, demonstrando apenas tendências de comportamento. No entanto, em relação aos resultados obtidos para os traços sem cal, as misturas com cal apresentaram resultados bastante significativos no que diz respeito à um aumento no teor de água combinada.

Para todas as relações  $a/mc$  os traços com cal demonstraram teores de água combinada maiores que os traços sem cal em todas as camadas estudadas, excetuando-se apenas a camada 1 da relação 0,75. Outro fator relevante foi que, para os traços com cal, os teores de água combinada mostraram-se crescentes com o aumento da profundidade. Nos traços sem cal, ao contrário, houveram decréscimos no teor de água combinada ao aumentar-se a profundidade de estudo.

Tais comportamentos devem-se à capacidade da cal de reter umidade, propiciando maior formação de produtos de hidratação.

Estes resultados apontam para o efeito benéfico da cal em concreto de menor resistência, com o objetivo de garantir a hidratação das camadas mais internas. Assim, a cal garante ao interior do concreto uma reserva de umidade maior durante o período de cura.

#### **4.4 Ensaaios de MEV**

Nesta pesquisa, os ensaios de MEV mostraram-se uma ferramenta de significativa utilidade na avaliação qualitativa dos resultados obtidos nos ensaios de porosidade e água combinada. Apesar de pontuais, as micrografias obtidas permitiram, através de sua análise, a confirmação visual daquilo que numericamente tinha sido constatado.

Por meio desta ferramenta, foram confirmadas as observações feitas principalmente na análise da camada de revestimento do concreto. As fissuras e os poros na superfície do concreto têm dimensões maiores do que o concreto do interior das peças. Fatos relatados na literatura, como a formação de filmes duplex ao redor das partículas de cinza volante e posterior formação de C-S-H tipo 2, puderam ser verificadas por meio da análise das micrografias de MEV desta pesquisa.

#### **4.5 Considerações Finais**

Nesta investigação, procurou-se adquirir e interpretar dados com o intuito de traçar um perfil da microestrutura da camada de cobertura do concreto, bem como da influência da adição de cinza volante e cal sobre estas características. Tendo em mãos estes dados, chega-se à conclusão que a camada de cobertura tem estrutura de poros de maiores dimensões do que o concreto do interior. Esta constatação pode ser determinante para a vida útil de estruturas de concreto, visto que da camada de cobertura depende a integridade da armadura de aço e da própria estrutura.

Como sugestão para melhorar as características desta camada, sugere-se o uso de adições como a cinza volante e a cal hidratada ao concreto fresco, cujos benefícios sobre as características pesquisadas ficaram evidentes neste trabalho. A devida dosagem e execução de

concretos com estas adições podem fazer a diferença principalmente em estruturas com exigências específicas quanto à durabilidade.

É importante salientar que o GEPECON da UFSM está desenvolvendo outras pesquisas paralelas e complementares a este trabalho, estudando outras variáveis (carbonatação, difusão e absorção de água, penetração e retenção de cloretos), cujos resultados darão maior embasamento para o entendimento da camada de cobertura do concreto.

As possibilidades são muitas e fica a sugestão para futuros trabalhos na pesquisa de outras adições pozolânicas, com variações no teor das adições e na relação a/mc.

## BIBLIOGRAFIA

AITCIN, P. C. **The art and science of high performance concrete.** Proceedings of Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete Science and Technology, Rome 8 October 1997. Disponível em : <<http://www.encosrl.it/enco%20srl%20ENG/servizi/pubblicazioni/simposio.html>> Acesso em: 01 fev. 2004.

AITCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho.** São Paulo: Pini. 2000.

A CONSTRUÇÃO AUTO SUSTENTÁVEL. **Revista Qualidade na Construção**, n. 12, ano II, SINDUSCON/ SP, 1998.

ALMUSALLAN, A. A. **Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete.** Cement and Concrete Composites, n. 23, pp. 353-361, 2001.

ALVES, A. S. **Efeitos físicos e químicos de misturas pozolânicas na carbonatação e penetrabilidade à água em concretos de alto desempenho.** Santa Maria, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

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

ANDRADE, J., DAL MOLIN, D. **Deterioration of reinforced concrete structures in a marine environment in Brazil: a case study.** In: Dhir, R., McCarthy, M. (eds.) Concrete durability and repair technology. International Congress Creating with concrete, Dundee, 1999. Proceedings. London: Thomas Telford, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de obras de concreto armado: NBR 6118.** Rio de Janeiro, 2003.

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

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

\_\_\_\_\_. **Ensaio de compressão de corpos cilíndricos de concreto: NBR 5739.** Rio de Janeiro, 1984.

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

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

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

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

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

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

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

\_\_\_\_\_. **Cimento Portland pozolânico:** NBR 5736. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **Cimento Portland: determinação da perda ao fogo:** NBR 5743. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto –** NBR 7680. Rio de Janeiro. 1983.

BABU, G. & RAO, G. S. N. **Efficiency of fly ash in concrete with age.** Cement and Concrete Research, vol. 26, Nº 3, pp 465-474, USA, 1996.

BASHEER, P. A. M., LONG, A. E., MONTGOMERY, F. R. **An interaction model for causes of deterioration and permeability of concrete.** In: P. K. Mehta (ed.). Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium – Concrete Technology: Past, Present, Future. Berkeley, 1994, Proceedings. Detroit: American Concrete Institute, p. 383-397 (SP-144).

BEAUDOIN, J. J., MARCHAND, J. Pore structure. In: Ramachandran, V. S., Beaudoin, J. J.(eds.) **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: principles, techniques and applications.** Norwich (NY), Noyes Publications / William Andrew Publishing, p. 528-628, 2001.

BHARATKUMAR, B. H.; NARAYANAN, R.; RAGHUPRASAD, B. K.; RAMACHANDRAMURTHY D. S. **Mix proportioning of high performance concrete**. Cement and Concrete Composites n°23, 2001, pp 71-80.

BOURDETTE, B., RINGOT, E., OLLIVIER, J. P. **Modelling of the transition zone porosity**. Cement and Concrete research, vol. 25, n. 4, pp. 741-751, USA, 1995.

BOUZOUBAË, N., ZHANG, M. H.; BILODEAU, A.; MALHOTRA, V. M. **Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements**. Fly Ash, Silica Fume, Slag & Natural Pozzolans in Concrete, CANMET/ACI/JCI Conference. Proceedings, 1998. 6<sup>th</sup>. Bangkok, Thailand (SP-178).

BOUZOUBAË, N., ZHANG, M. H., MALHOTRA, V. M. **Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash**. Cement and Concrete Research 31, 2001.

CALLEJA, J. **En torno de las cenizas volantes en los cementos y en los hormigones, a la luz de un trabajo presentado en el 7º Congreso Internacional de la Química de los Cementos**. Materiales de Construcción, Madrid, n. 185, p. 3 - 13, 1982.

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.

CERVO, T. C. **Influência da finura e do teor de pozolana na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. Santa Maria, 2001. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

COLLEPARDI, M. **A holistic approach to concrete damage induced by delayed ettringite formation**. Proceedings of Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete Science and Technology, Rome 8 October 1997. Disponível em : <<http://www.encosrl.it/enco%20srl%20ENG/servizi/pubblicazioni/simposio.html>> Acesso em: 01 fev. 2004.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **New Approach to Durability Design**. Lausanne: CEB, 1997 (Bulletin 238).

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Durable concrete structures CEB design guide**. Lausanne: CEB, 1989 (Bulletin 182).

CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Site CEBDS**, disponível em <www.cebds.com.br>, acessado em 20 jul. 2001.

CONSTRUÇÃO E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Revista Qualidade na Construção**, n. 23, ano III, SIDUSCON/SP, 2000.

DAVIDOVITS, J. **High-Alkali cements for 21<sup>st</sup> century concretes**. In: Mehta, P. K. (ed.) Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium – Concrete Technology: Past, Present and Future, Berkeley, 1994. Proceedings. Detroit: American Concrete Institute, p. 383-397 (SP-144).

DIAMOND, S., RAVINA, D., LOVELL, J. **The occurrence of duplex films on fly ash surfaces**. Cement and Concrete Research, vol. 10, pp. 297-300, USA, 1980.

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

FU, X., WANG, Z., TAO, W., YANG, C., HOU, W., DONG, Y., WU, X. **Studies on blended cement with large amount of fly ash**. Cement and Concrete Research n°32 (2002), pp 1153-1159.

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

\_\_\_\_\_. **Durabilidade do concreto**. Polígrafo, 1 v., não paginado, PPGEC/UFMS, Santa Maria, primeiro semestre de 2001.

GIOVANNETTI, E. **Princípios básicos sobre concreto fluido**. São Paulo: Ibracon/Pini, 1999.

GOÑI, S.; LUXÁN, M. P.; GUERRERO, A.; HERNÁNDEZ, M. S.; MACÍAS, A. **Microstructural study of hydration reactions of a fly ash-belite cement**. Fly Ash, Silica Fume, Slag & Natural Pozzolans in Concrete, 6th CANMET/ACI/JCI Conference. Proceedings, 1998. Bangkok, Thailand (SP-178).

GOUVEIA, J.; PAPA, G. **Desperdício versus qualidade na construção civil**. A Razão, Santa Maria, Seção Classificados, p. 04, 21 jan. 2004.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – fundamentos e aplicações na Engenharia Civil**. São Paulo: Pini. 2002.

HELENE, P. R. L. & TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini. 1992.

HILL, J.; SHARP, J. H. **The mineralogy and microstructure of three composite cements with high replacement levels**. Cement and Concrete Composites, n. 24, pp. 191-199, 2002.

HOPPE F°, J. F. **Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais**. Santa Maria, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

HÜBERT, C., WIEKER, W., HEIDEMANN, D. **Investigations of hidration products in high volume fly ash binders**. In: V. M. Malhotra (Ed.). Seventh CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Chennai, India, 2001 (SP-199).

ISAIA, G. C. **Controle de Qualidade das Estruturas de Concreto Armado**. Santa Maria: UFSM, 1988.

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

ISAIA, G. C. Synergic action of fly ash in ternary mixtures with silica fume and rice husk ash. International Congress on the Chemistry of Cement, 10<sup>th</sup>. **Proceedings**, v. 3, Gothenburg, Sweden, 1997.

\_\_\_\_\_. **Pesquisa sobre o cobrimento da armadura das estruturas de concreto: revisão sobre estrutura dos poros e mecanismos de transporte**. Santa Maria, 2001 [a]. Polígrafo.

\_\_\_\_\_. Avanços e perspectivas sobre a durabilidade do concreto com altos teores de adições minerais: A experiência da UFSM. In: Seminário Internacional sobre Durabilidade das Estruturas de Concreto, 2. Goiânia, GO, 2001 [b].

\_\_\_\_\_. Durabilidade do concreto ou das estruturas de concreto? Reflexões. Workshop sobre durabilidade das construções, 2. São José dos Campos, SP. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2001 [c].

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, n. 25, pp. 69-76, 2003.

JAWED, I. **Hardened mortar and concret with fly ash**. In: WESCHE, K. (ed) Fly ash in concrete, Properties and performance. London: E&FN SPON, 1991.

KASZYN'SKA, M. **Early age properties of high-strength/high-performance concrete**. *Cement and Concrete Composites*, n. 24, pp. 253-261, 2002.

KAWAGUCHI, N.; KOHNO, K.; KUROSE, Y.; BAKOSHI, T. **Investigations on durability of high-volume fly ash concrete**. In: V. M. Malhotra (Ed.), *Advances in Concrete Technology*, 4<sup>th</sup> CANMET/ACI International Symposium, Tokushima, Japan, 1998 (SP 179).

KOHONO, K., MITSUIWA, Y., ISHIMARU, K. **Effect of steam curing on compressive strength of fly ash concrete**. Fly Ash, Silica Fume, Slag & Natural Pozzolans in Concrete, 6<sup>th</sup> CANMET/ACI/JCI Conference. Proceedings, 1998. Bangkok, Thailand (SP-178).

KOLLEK, J. J. **The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau Method – a recommendation**. *Revista Materials and Structures*, Paris: RILEM, v. 22, 1989.

LESSARD, M.; SARKAR, S. L.; KSINSIK; D. W.; AİTCIN, P. C. **Long-term behavior of silica fume concrete**. *Mineral Admixtures, Compilation 22*, American Concrete Institute, USA, 1993.

LI, B.; LIANG, W.; HE, Z. **Study on high-strength composite Portland cement with a larger amount of industrial wastes**. *Cement and Concrete Research*, n.32, pp. 1341-1344. 2002.

LONG, A. E. **The influence of controlled permeability formwork on the properties of near surface concrete**. In: V. M. Malhotra (Ed.), 2<sup>nd</sup> CANMET/ACI International Symposium *Advances in Concrete Technology*, Proceedings. Nevada, USA, 1995 (SP-154).

McCARTER, W. J., CHRISP, T. M., STARRS, G., BASHEER, P. A. M. **Developments in near-surface testing of covercrete**. In: V.M. Malhotra (Ed.), 5<sup>th</sup> International Conference of Durability of Concrete, Barcelona, 2000. Proceedings. CANMET/ACI, 2000, 2v., v. 1, (SP 192).

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

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, J. P. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MESEGUER, Álvaro G. **Controle e Garantia da Qualidade na Construção**. SINDUSCON/SP, São Paulo, 1991.

MINDESS, S., YOUNG, J. F. **Concrete**. New Jersey: Prentice Hall, 1981.

MONTGOMERY, D. G., HUGES, D. C., WILLIAMS, R. I. T. **Fly ash in concrete – a microstructure study**. *Cement and Concrete Research*, vol. 11, pp 591-603, USA, 1981.

MONTGOMERY, D.; DIAMOND, S. **The influence of fly ash cenospheres on the details of cracking in fly ash-bearing cement pastes**. *Cement and Concrete Research*, vol. 14, pp. 767-775, 1984.

MORAES, R. C. **Efeito Físico e Pozolânico das Adições Minerais sobre a Resistência Mecânica do Concreto**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

NAKAMOTO, J., TOGAWA, K., MIYAGAWA, T., FUJII, M., NAGAOKA, S. **Freezing and Thawing Resistance of Hig Slag Content Concrete**. In: V. M. Malhotra (Ed.). *Fourth CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology*, Tokushima, Japan, 1998 (SP179).

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1997.

OLIVEIRA, M. M. **Tecnologia da Conservação e da Restauração**. Salvador: EDUFBA: ABRACOR, 2002.

OLIVEIRA, C. T. A. **Água do poro de pastas de cimentos de escória**. São Paulo, 2000. Tese de doutoramento. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PARROT, L. J. **Curing time for portland and portland/fly ash concretes**. In: V. M. Malhotra (Ed.) *Fifth International Conference of Durability of Concrete*, Barcelona, 2000. *Proceedings. CANMET/ACI*, 2000, 2v., v. 2, pp. 35 – 48.

PETRY, S. B.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; SILVEIRA, R. G. **Estudo da penetração de oxigênio e absorção capilar na camada de cobrimento de protótipos de concreto estrutural com altos teores de cinza volante.** In: Congresso Brasileiro do Concreto, 45. **Anais...** Vitória – ES, Brasil, 2003.

QUEIROGA, M. V. M., **Concreto de Alta Resistência – Propriedades, Características e experimentações.** Canoas: ULBRA, 2000.

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

SARKAR, S. L. & AİTCIN, P. C. **Comparative study of the microestruturas of normal and very high-strength concretes.** Cement, Concrete and Aggregates. CCAGDP, v. 9, n. 2, Winter, 1987, pp. 57-64.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concreto.** São Paulo, 1998. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.

SERRA, G. G.; CAMPOS, P. E. F. **Pré fabricados, concreto e arquitetura.** Site do “Núcleo de Pesquisas em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo” da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, disponível em <[www.usp.br/nutau/nutau.htm](http://www.usp.br/nutau/nutau.htm)> Acesso em 18 jul. 2001.

SILVEIRA, R. G.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; PETRY, S. B. **Estudo da durabilidade da camada de cobrimento de protótipos de concreto estrutural com altos teores de cinza volante.** ° Congresso Brasileiro do Concreto, 45. **Anais...** Vitória – ES, Brasil, 2003.

SIVASUNDARAM, V.; CARETTE, G. C.; MALHOTRA, V. M. **Selected properties of high-volume fly ash concretes.** Mineral Admixtures, Compilation 22, American Concrete Institute, USA, 1993.

STUMPP, M. **Carbonatação de Concretos com Altos Teores de Adições Minerais e Cal Hidratada.** Santa Maria, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SUGITA, S.; YU, Q.; SHOYA, M.; TSUKINAGA, Y.; ISOJIMA, Y. **On the semi-industrial production of highly reactive rice husk ash and its effect on cement and concrete properties.** 10<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, Proceedings, v. 3, Gothenburg, Sweden, 1997.

SURYAVANCHI, A. K., SWAMY, R. N. **An evaluation of controlled permeability formwork for long-term durability of structural concrete elements.** Cement and Concrete Research, vol. 27, n. 7, pp 1047-1060, USA, 1997.

SWAMY, R. N. & DARWISH, A. A. Effectiveness of mineral admixtures and curing regimes on air permeability of concrete. In: MALHOTRA, V. M. (ed). International Conference on Durability of Concrete, 4<sup>th</sup>, Sydney, 1997. **Proceedings** .... American Concrete Institute, 2 v., v.1 (SP-170).

TAN, K. & GJORV, O. E. Performance of concrete under different curing conditions. **Cement and Concrete Research.** v. 26, n. 3, pp 355-361, USA 1996.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** London: Thomas Telford, 2 ed., 1997.

TEMIZ, H. & KARAKEÇI, A. Y. An Investigation on microstructure of cement paste containing fly ash and silica fume. **Cement and Concrete Research.** v. 32, pp 1131-1132, USA, 2002.

TENOUTASSE, N. & MARION, A. M. **Relationship between microstructure and durability of blended cement.** In: International Congress on the Chemistry of Cement, 8<sup>th</sup>, v. 5, Rio de Janeiro, Brazil, 1986.

UCHIKAWA, H. **Effect of blending components on hydration and structure formation.** In: International Congress on the Chemistry of Cement, 8<sup>th</sup>, v. 5, Rio de Janeiro, Brazil, 1986.

UCHIKAWA, H., HANEHARA, S., HIRAO, H. High volume wastes concrete. In: Malhotra, V. M. (ed.) CANMET/ACI/JCI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, 4<sup>th</sup>, Tokushima, 1998. **Proceedings.** American Concrete Institute, Farmington Hills, p. 23-37, 1998 (SP-179).

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

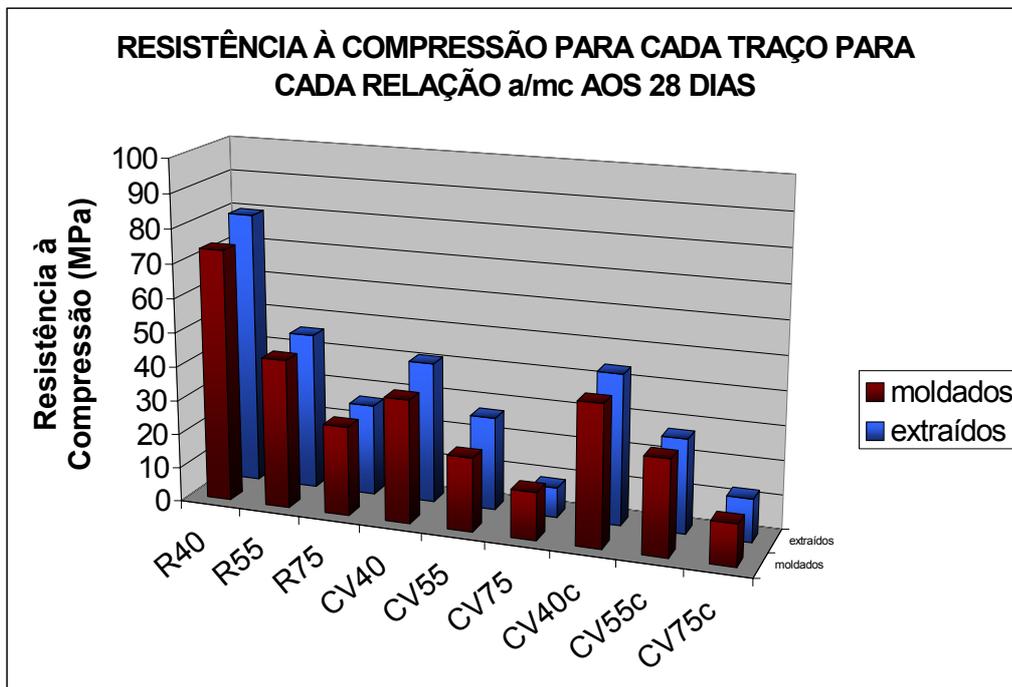
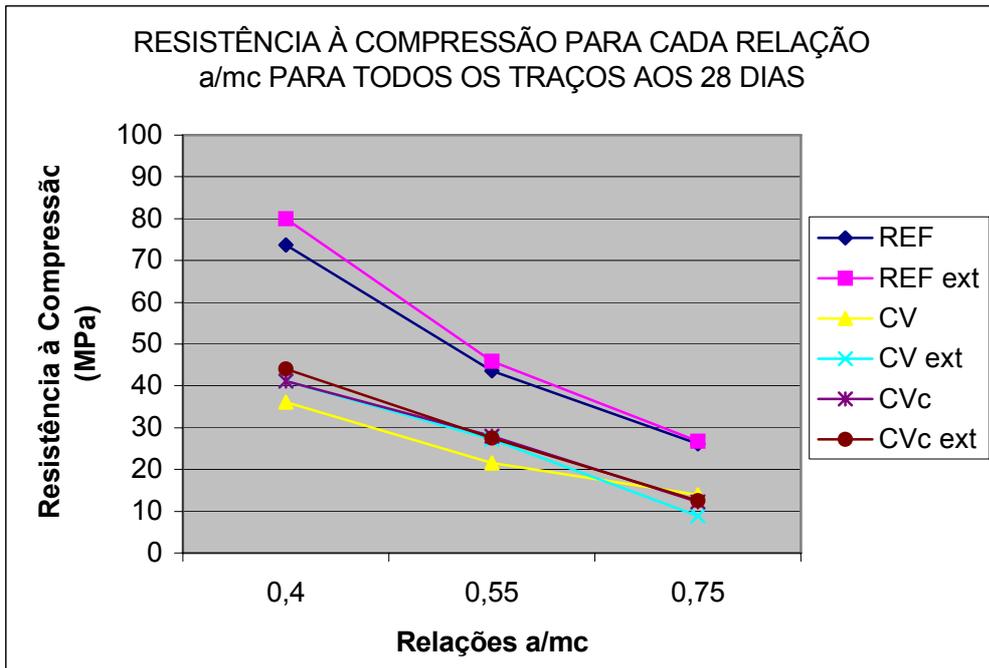
VAGHETTI, M. A. O. **Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland.** Santa Maria, 1999. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

VENQUIARUTO, S. D. **A influência da finura e do teor de adições minerais na carbonatação do concreto.** Santa Maria, 2002. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

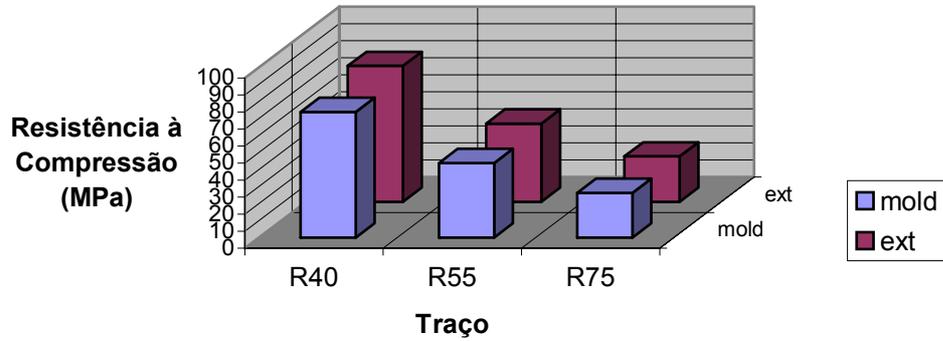
YUASA, N., KASAI, Y., MATSUI, I. Inhomogeneous distribution of moisture content and porosity in concrete. In: Dhir, R., McCarthy, M. (eds.) Concrete durability and repair technology. International Congress Creating with concrete, Dundee, 1999. **Proceedings**... London: Thomas Telford, 1999, p. 93-101.

YUASA, N.; KASAI, Y.; MATSUI, I. Inhomogeneous distribution of compressive strength from surface layer to interior of concrete structures. In: V. M. Malhotra (Ed.) 5<sup>th</sup> International Conference of Durability of Concrete, Barcelona, 2000. **Proceedings**... CANMET/ACI, 2000, 2v., v. 2, pp. 269 – 281 (SP 192).

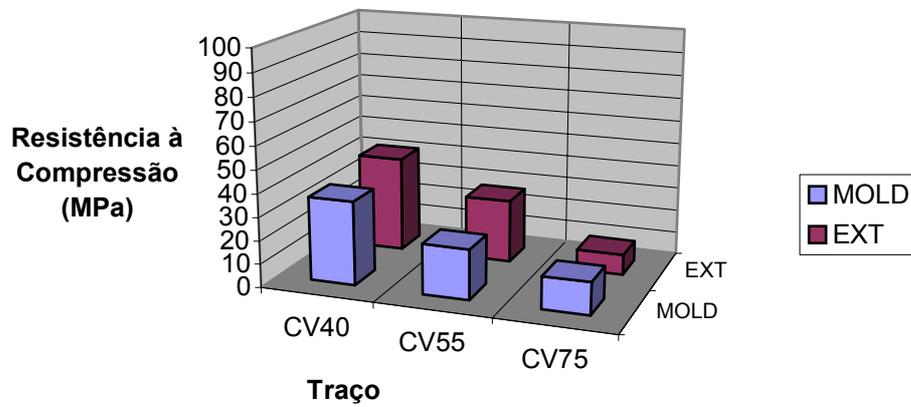
## ANEXO – Gráficos



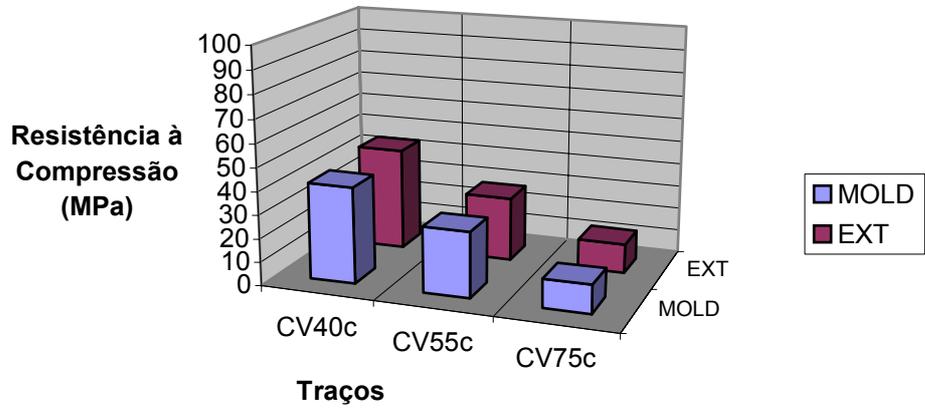
**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA OS  
TRAÇOS DE REFERÊNCIA MOLDADOS E  
EXTRAÍDOS AOS 28d**



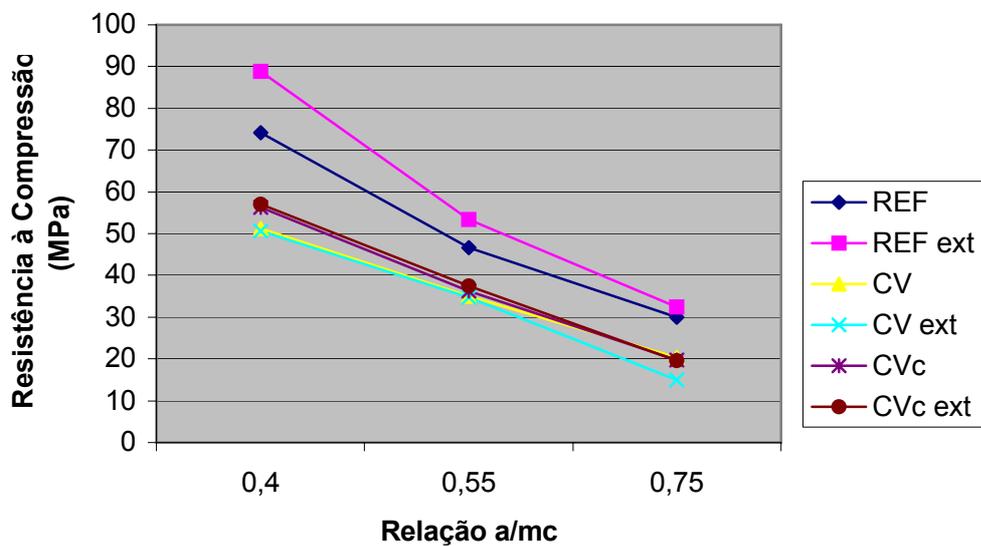
**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA OS  
TRAÇOS COM 50% DE CV MOLDADOS E  
EXTRAÍDOS AOS 28 DIAS**



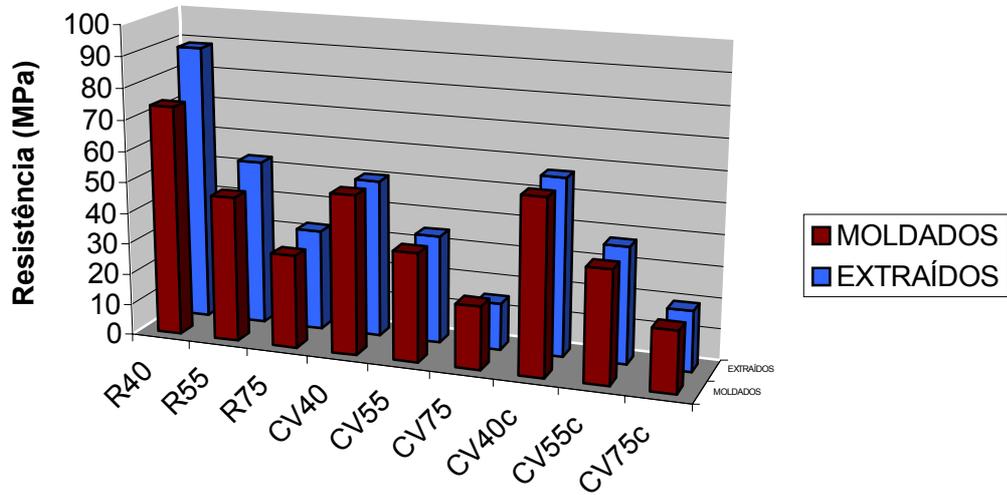
**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA OS  
TRAÇOS COM 50% DE CV E 20% DE CAL  
EXTRAÍDOS E MOLDADOS AOS 28 DIAS**



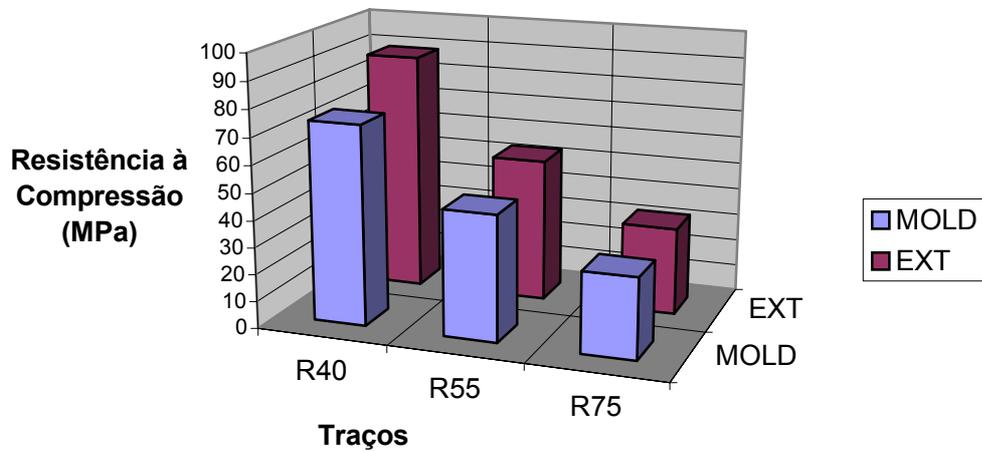
**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA CADA  
RELAÇÃO a/mc PARA TODOS OS TRAÇOS AOS 91  
DIAS**



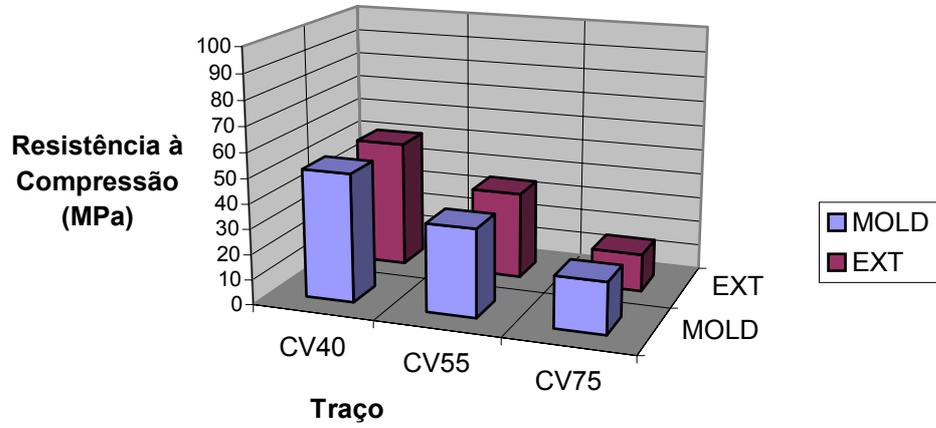
### Resistência à Compressão para cada a/mc aos 91 dias



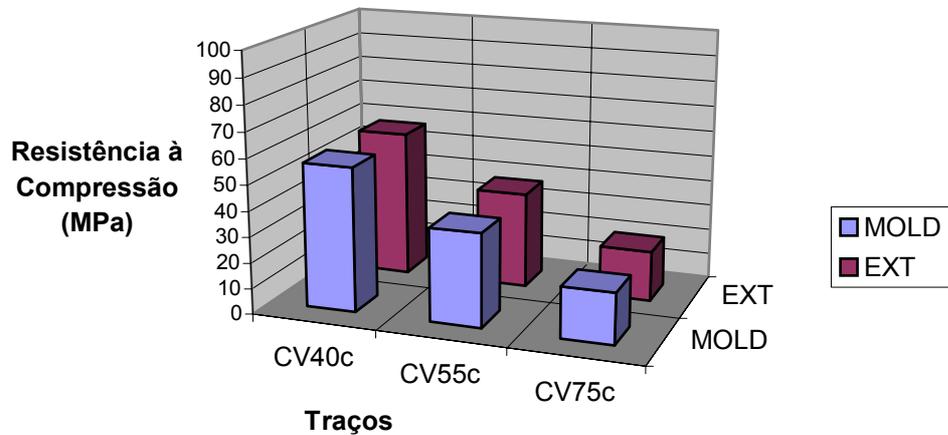
### RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA OS TRAÇOS DE REFERÊNCIA MOLDADOS E EXTRAÍDOS AOS 91 DIAS



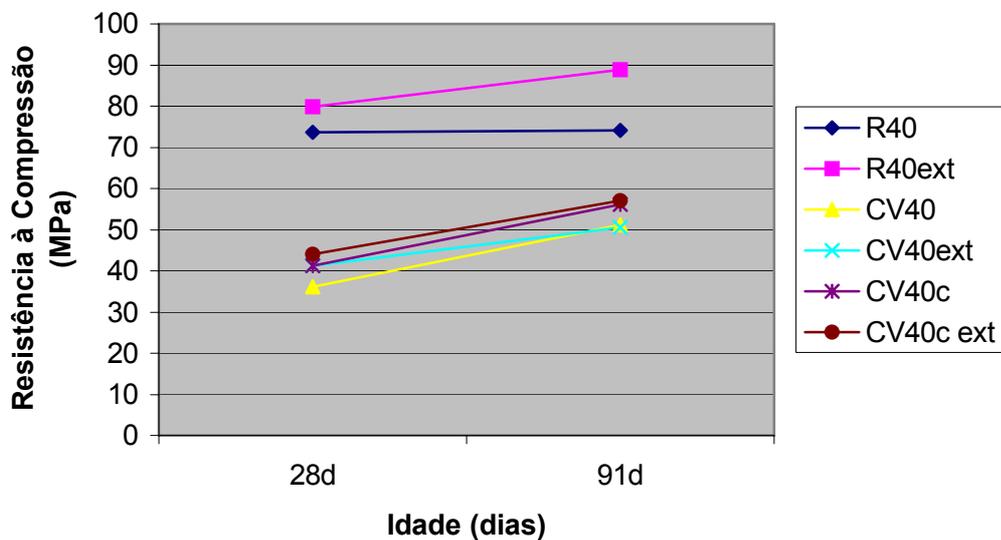
**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA O TRAÇO COM CV SEM CAL MOLDADOS E EXTRAÍDOS AOS 91 DIAS**



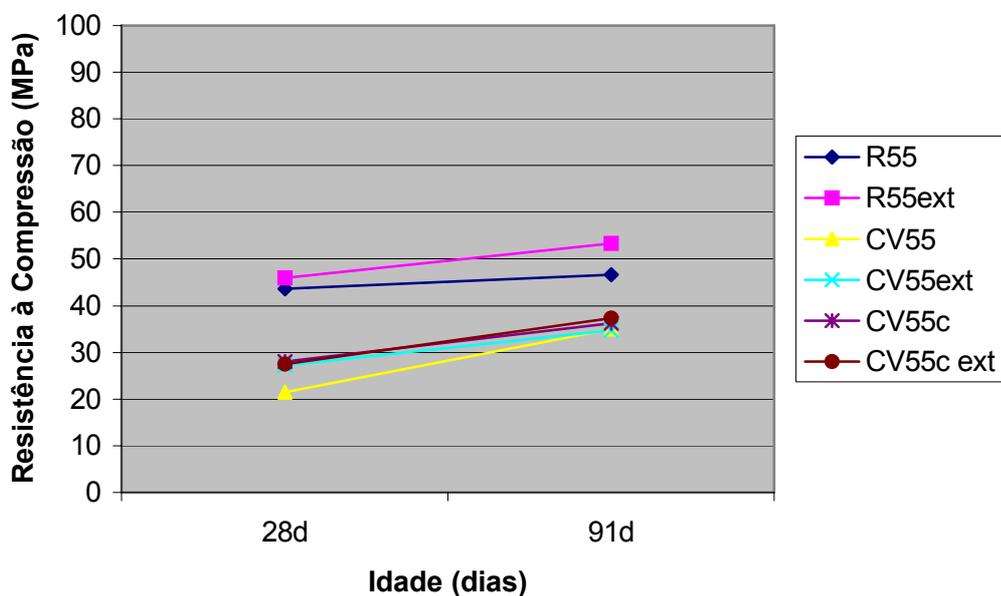
**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS TRAÇOS COM CV E CAL MOLDADOS E EXTRAÍDOS AOS 91 DIAS**



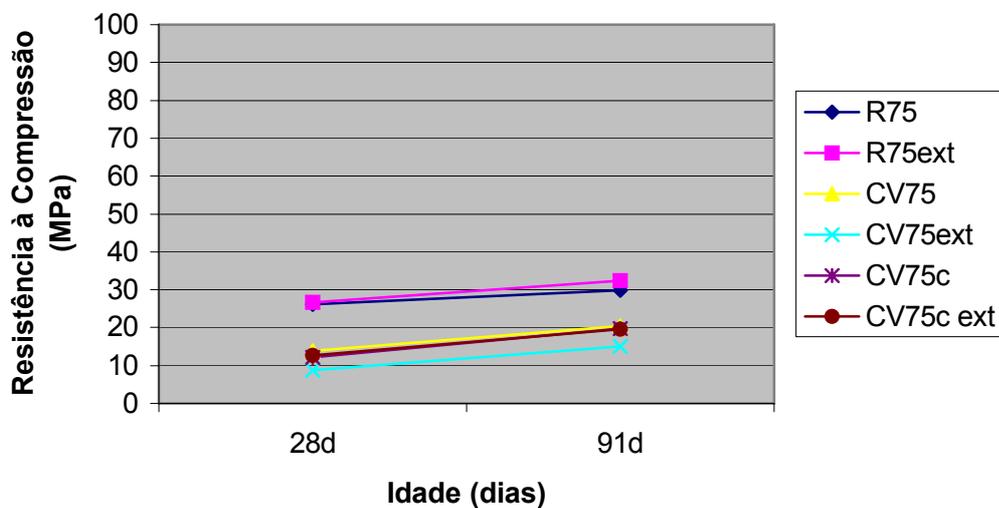
### DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA PARA $a/mc=0,4$



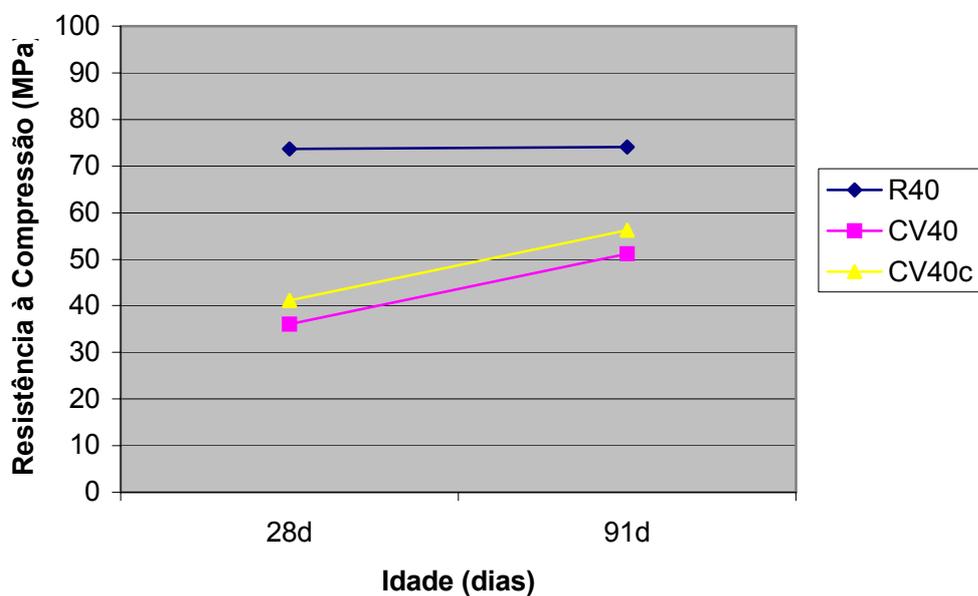
### DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA $a/mc=0,55$



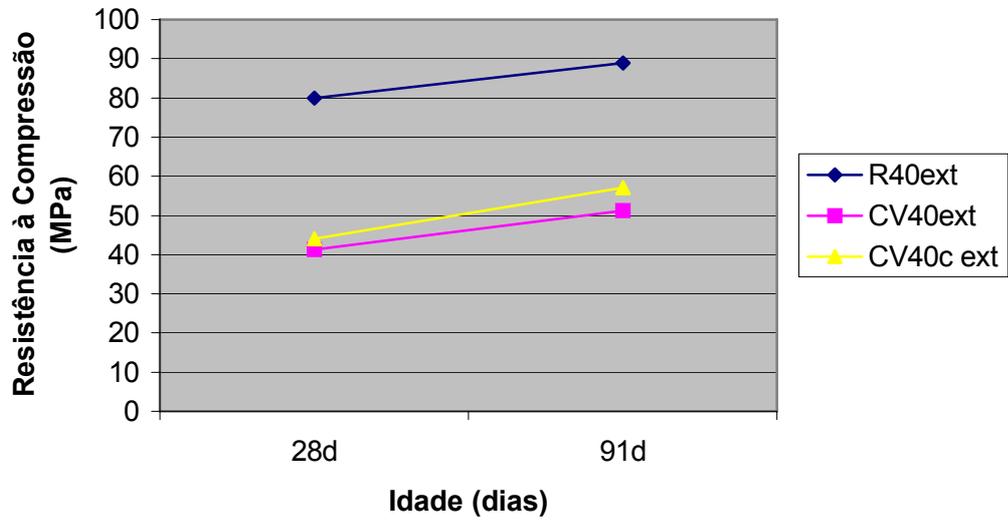
**DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA COM A IDADE PARA  $a/mc=0,75$**



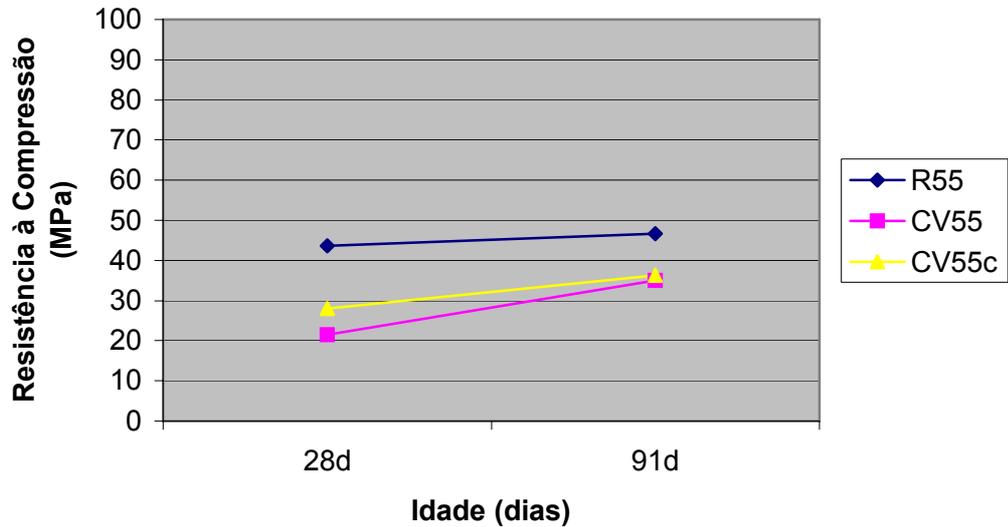
**DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE 28 À 91d PARA  $A/mc= 0,40$  PARA CPs MOLDADOS**



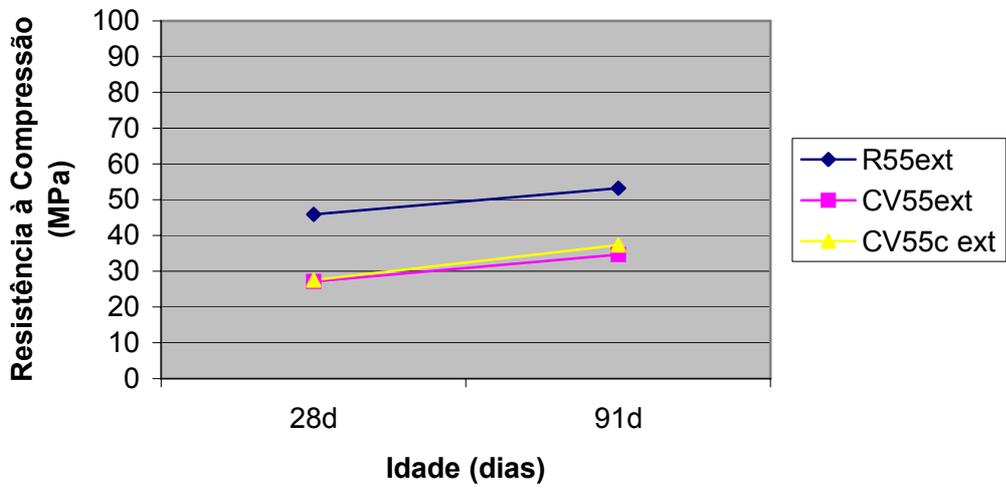
DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE 28 À 91d PARA A/mc=0,40 PARA TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS



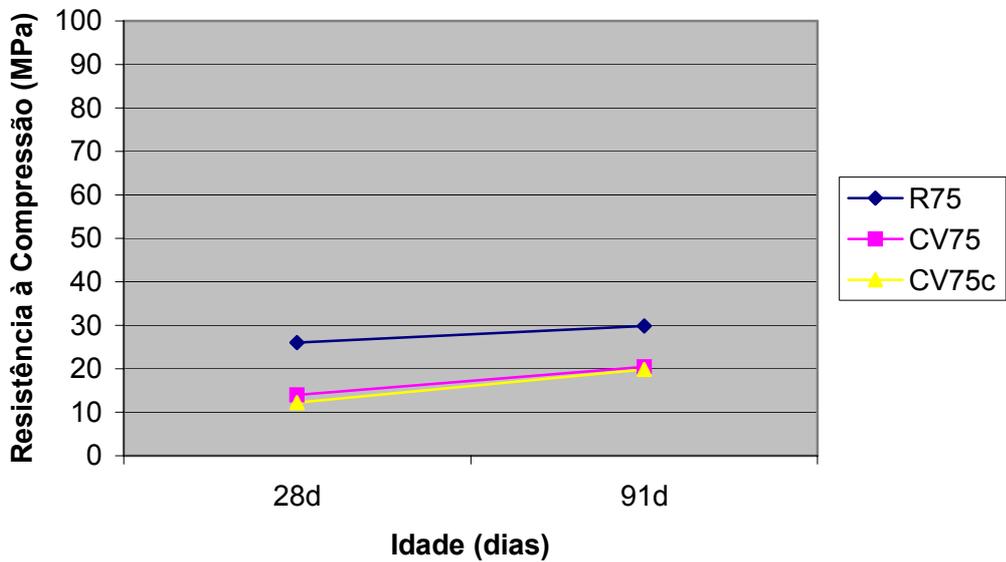
DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE 28 À 91d PARA A/mc=0,55 PARA CPs MOLDADOS

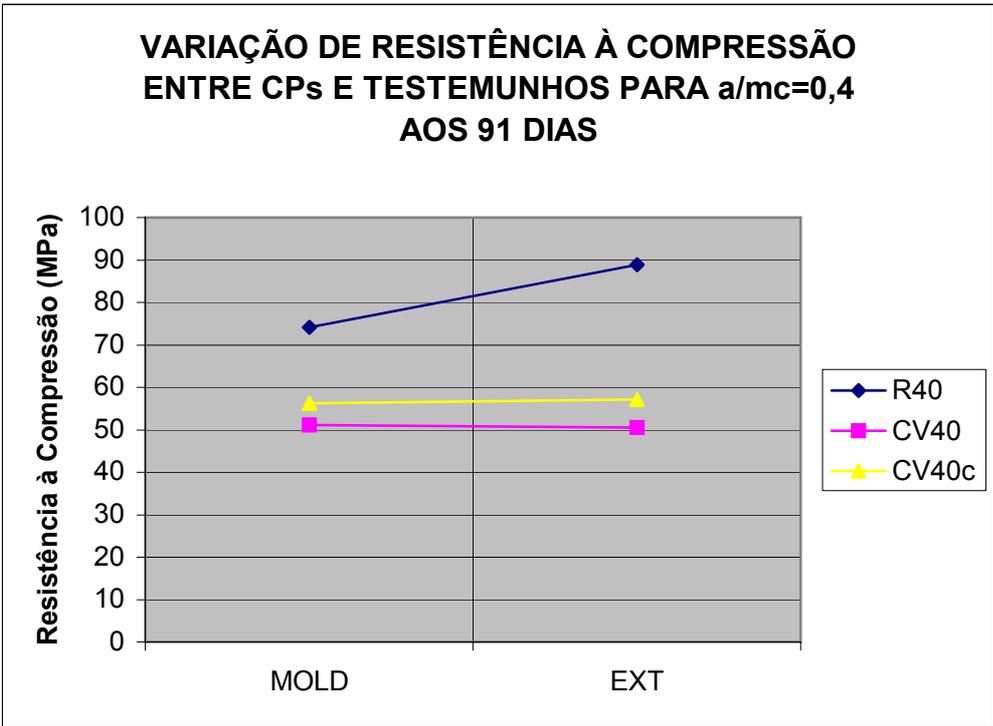
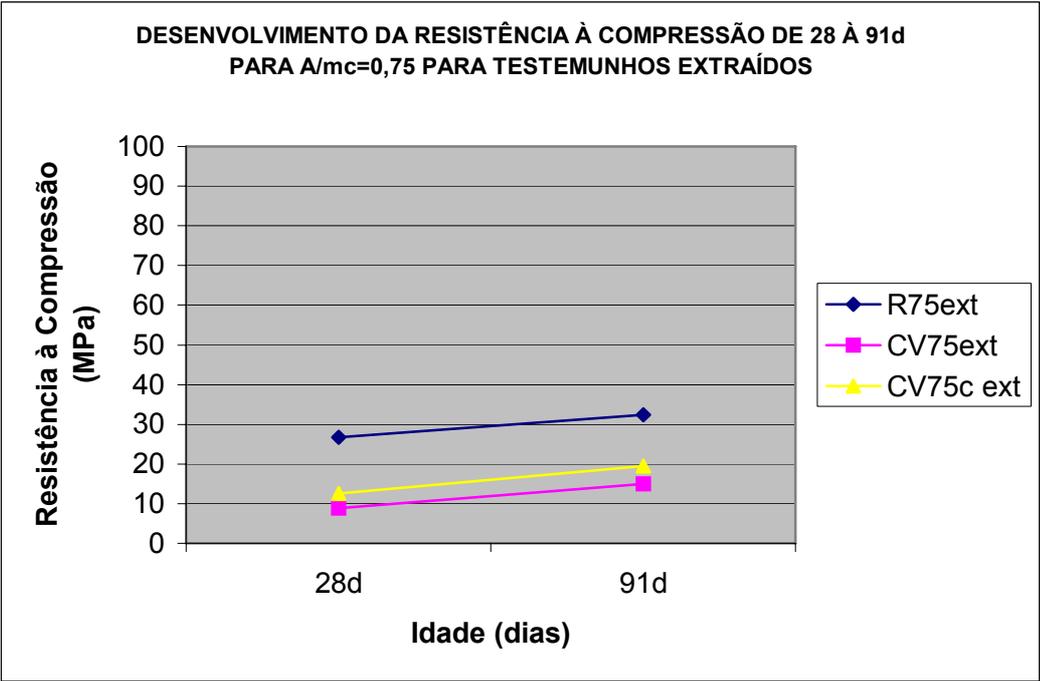


DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE 28 À 91d  
PARA A/mc=0,55 PARA TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS

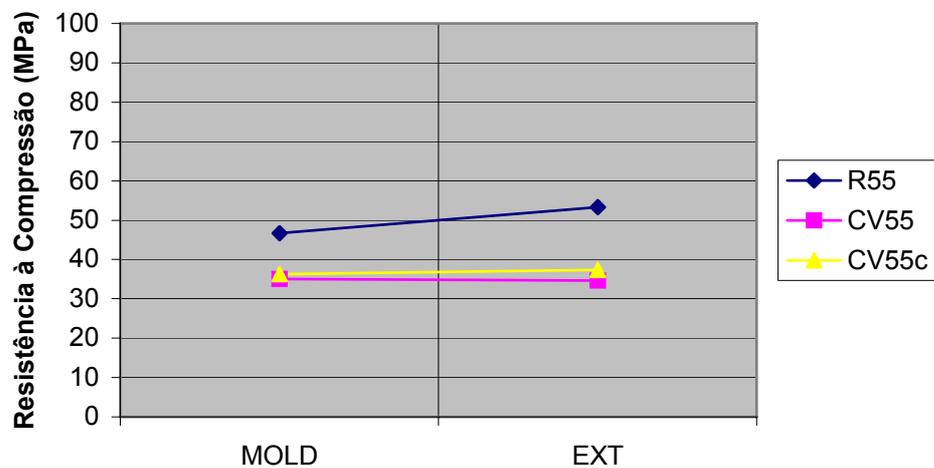


DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE 28 À 91d  
PARA A/mc=0,75 PARA CPs MOLDADOS





**VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
ENTRE CPs E TESTEMUNHOS PARA  $a/mc=0,55$   
AOS 91 DIAS**



**VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
ENTRE CPs E TESTEMUNHOS PARA  $a/mc=0,75$   
AOS 91 DIAS**

