

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

***SANDRA MARIA DE LIMA***

**Concreto de alto desempenho aplicado a sistemas de processamento e  
armazenagem de alimentos em baixas temperaturas**

**São Carlos**

**2008**

**SANDRA MARIA DE LIMA**

**Concreto de alto desempenho aplicado a sistemas de processamento e  
armazenagem de alimentos em baixas temperaturas**

**Tese apresentada à Escola de  
Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Doutora em  
Engenharia Civil.**

**Área de Concentração: Engenharia das  
Estruturas.**

**Orientador: Prof. Dr. Jefferson B. L.  
Liborio.**

**São Carlos**

**2008**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA  
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,  
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

L732c

Lima, Sandra Maria de  
Concreto de alto desempenho aplicado a sistemas de  
processamento e armazenagem de alimentos em baixas  
temperaturas / Sandra Maria de Lima ; orientador  
Jefferson Benedicto Libardi Liborio. -- São Carlos, 2008.

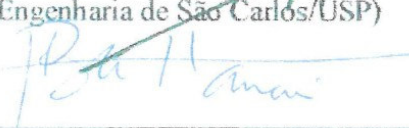
Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação e Área de  
Concentração em Engenharia de Estruturas) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2008.

1. Concreto. 2. Alto desempenho. 3. Durabilidade. 4.  
Baixas temperaturas. 5. Gelo e degelo. 6. Sistemas  
vazios. 7. Armazenagem de alimentos. I. Título.

**FOLHA DE JULGAMENTO**Candidata: Engenheira **SANDRA MARIA DE LIMA**

Tese defendida e julgada em 20/10/2008 perante a Comissão Julgadora:

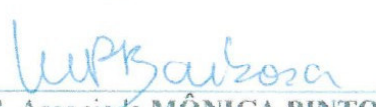
 *Aprovado*  
 Prof. Dr. **JEFFERSON BENEDITO LIBARDI LIBÓRIO** (Orientador)  
 (Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

  
 Prof. Titular **JOÃO BENTO DE HANAI**  
 (Escola de Engenharia de São Carlos/USP)


*APROVADA*

  
 Prof. Dr. **LIBANIO MIRANDA PINHEIRO**  
 (Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

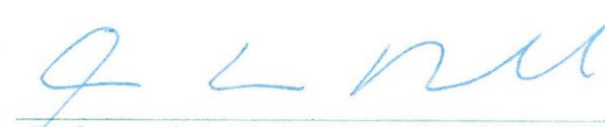
*APROVA DA*

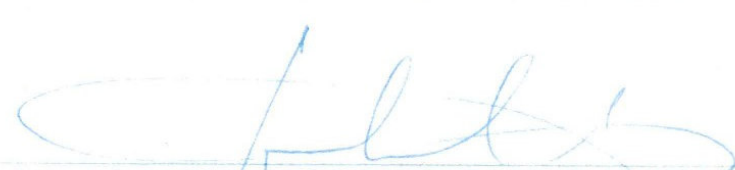
  
 Prof. Associada **MÔNICA PINTO BARBOSA**  
 (Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" /UNESP/Campus de Ilha Solteira)

*Aprovada*

  
 Prof. Titular **PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE**  
 (Escola Politécnica/USP)

*aprovado*

  
 Prof. Associado **MARCIO ANTONIO RAMALHO**  
 Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
 Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)

  
 Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**  
 Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*Dedicatória*

*Ao Marcelo, meu filho muito amado e companheirinho inseparável!*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Espírito Santo de Amor e à Virgem Santíssima pela inspiração, força e discernimento na minha caminhada.

Ao meu estimado orientador, Prof. Dr. Jefferson Liborio, que um dia me deu a oportunidade de sonhar e planejar um futuro melhor, para mim e para a minha família, o qual se consolida com esta conquista.

À minha querida mãe, D. Neyde, pela prontidão com que me auxilia em todas as minhas dificuldades e pela alegria com que comemora minhas vitórias, mas principalmente pelo amor desmedido!

Ao meu pai, Sr. Lucírio, pela admiração externada que muito me fortalece para enfrentar cada desafio.

Aos meus irmãos e sobrinhos queridos, pelo amor compartilhado!

Aos amigos do CEFETMT, especialmente, Albéria e Alceu Cavalcanti, Cezar Santos, Éder de Sousa, Ênio Amorim, Juzélia Santos, Manuel Farto, Simone Caldeira, Sueli Valezi, Wilson e Roseli Conciani, pela convivência fraterna.

Ao Dr. Luiz Vicente Vareda, pela colaboração e efetiva participação na realização dos ensaios. Ao técnico de laboratório Jorge Bravo, pelo trabalho dedicado.

Aos colegas de doutorado: Alessandra Castro, Fernanda Giannotti, José Américo Salvador, Rafaella Tiboni, Rodrigo, Sandra Almeida, Tiago Catoia e Valdirene Silva, pela convivência salutar e preciosa troca de conhecimentos.

À Degussa (MBT) pela doação dos aditivos utilizados nessa pesquisa.

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento e Pesquisa, pelo apoio e financiamento desta pesquisa.

*“Enfim, irmãos, alegrai-vos, trabalhai no vosso aperfeiçoamento, encorajai-vos, tende um mesmo sentir e pensar, vivei em paz, e o Deus de amor e da paz estará convosco.”*

*(2 Cor 13, 11-12)*

## RESUMO

LIMA, S. M. DE. **Concreto de alto desempenho aplicado a sistemas de processamento e armazenagem de alimentos em baixas temperaturas**. 2008. 155 f. + anexos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

O desenvolvimento de um concreto de alto desempenho aplicado a sistemas de processamento e armazenagem de alimentos em baixas temperaturas teve por objetivo atender às indústrias de alimentos no Brasil que se utilizam da tecnologia do frio em seu processo industrial. A hegemonia mundial do mercado de carnes é brasileira, sendo que nossas indústrias são responsáveis por 33% desse mercado. A ausência de estudos para aprimorar e tornar as plantas industriais mais duráveis e condizentes com a importância do setor foi determinante na delimitação do tema desta tese. Desenvolveu-se um concreto de alto desempenho frente às possíveis situações em uma planta industrial: baixas temperaturas em ambientes secos e baixas temperaturas em ambientes sujeitos à umidade. A temperatura mínima a qual foram submetidos os concretos analisados foi de  $-35^{\circ}\text{C}$ . O método de dosagem e as diretrizes calcadas no reforço da matriz da pasta de cimento e refinamento de poros mostraram-se como uma alternativa para vencer as agressividades causadas pelas baixas temperaturas ao concreto. Até então, estudos sugeriam um sistema de ar cujos vazios teriam diâmetros em torno de 250  $\mu\text{m}$  espaçados com esta mesma distância entre eles e com conteúdo de  $6\pm 1\%$  para a proteção de concretos expostos a baixas temperaturas. A produção de um concreto coeso, com teor de ar de 3,5%, poros com diâmetro médio de 0,02 $\mu\text{m}$  e com área específica de 2,84 $\text{m}^2/\text{g}$ , provaram ser duráveis quando expostos ao congelamento e a ciclos de gelo e degelo. O fator de durabilidade para esses concretos foi de 97%. Além da durabilidade, o projeto de dosagem contemplou o aspecto econômico, produzindo 1MPa com 7,8 kg de cimento por metro cúbico de concreto. Os resultados foram obtidos por meio de ensaios dinâmicos, microscopia eletrônica de varredura, porosimetria por intrusão de mercúrio, absorção de água por imersão, além dos ensaios mecânicos de resistência à compressão, à tração na flexão e módulo de elasticidade.

Palavras-chave: concreto, alto desempenho, durabilidade, baixas temperaturas, gelo e degelo, sistema de vazios, armazenagem de alimentos.



## ABSTRACT

LIMA, S. M. DE. **High performance concrete applied to storage and processing system buildings at low temperatures.** 2008. 155 f. + annexes. Thesis (Doctorate). School of Engineering of São Carlos at the University of São Paulo, São Carlos, 2008.

Brazil has rapidly emerged as one of the world's leading meat exporters, being responsible by 33% of this market. In face of that, a high performance concrete (HPC), that can be applied to storage and processing system buildings at low temperatures, has been developed with the aim of answering the needs of Brazilian food manufacturers that use cooling technology during industrial process. The lack of studies to improve industrial plants and make them more durable was determinant to delineate this thesis subject. A high performance concrete was designed to resist to low temperatures at dry environments as well as at moist ones. Concrete was exposed to a target temperature of  $-35^{\circ}\text{C}$ . The dosage method and the guidelines based on the strengthening of bulk cement and the porous refinement showed to be an alternative to overcome the aggressiveness caused by low temperatures to concrete. To this day, studies have suggested air voids systems to protect concrete from low temperature effects. According to them, the air voids should have about  $250\mu\text{m}$  of diameter, spaced from each other this same distance and with an air content of  $6\pm 1\%$ . However, making a cohesive concrete, with 3,5% of air content and an average diameter porous of  $0,02\mu\text{m}$  with an specific surface of  $2,84\text{m}^2/\text{g}$ , resulted in a durable concrete, even when exposed to frost / thawing cycles. The durability factor of these concretes achieved 97%. Besides durability, the dosage design brought economical advantages, producing 1 MPa with 7,8 kg of cement per cubic meter of concrete. The results were obtained through dynamic tests, scanning electron microscopy, mercury intrusion porosimetry and water absorption by immersion. In addition, tests of compression, tension strength and elastic modulus were carried out.

Key-words: concrete, high performance, durability, low temperatures, freezing-thawing cycles, air void system, foodstuff storage.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Consumo mundial de carnes e a participação brasileira no mercado	7
Figura 2 - Detalhes do sistema construtivo de ambientes climatizados: (a) painel isolante; (b) corte esquemático do painel de vedação vertical e piso de um ambiente climatizado	10
Figura 3 - Setor de desossa de um frigorífico	11
Figura 4 - Detalhes do piso em um frigorífico com tempo de utilização de 18 meses. (a) Fissuração em rede atingindo toda a extensão do piso; (b) Estado mais intenso de deterioração nos caminhos preferenciais de água; presença de sangue nas fissuras colaborando para contaminação do ambiente; (c) Grandes fissuras já reparadas.	12
Figura 5 - Exemplo de ábaco de dosagem de concreto	17
Figura 6 - Equipamentos utilizados na realização dos ensaios de gelo e degelo dos corpos-de-prova de concreto	19
Figura 7 - Organograma do método adotado para a pesquisa de CAD aplicado a sistemas de processamento e armazenamento de alimentos em baixas temperaturas.	20
Figura 8 - Elaboração de concretos estruturais de alta durabilidade	26
Figura 9 - Representação diagramática da pasta de cimento em estado fresco com relação a/c de 0,65 e de 0,25. A razão das áreas de água e cimento em massa é igual à razão em volume	29
Figura 10 - Microestrutura de uma pasta com alta relação a/c	31
Figura 11 - Microestrutura de um CAD	31
Figura 12 - Influência das condições de cura na ocorrência da retração autógena	35
Figura 13 - Regime de cura mais apropriado no decorrer da reação de hidratação do CAD	35
Figura 14 - Esquema para distribuição das fases de um CAD para ambientes com baixas temperaturas.	37
Figura 15 - Estrutura da pasta de cimento	41

Figura 16 -	Micrografias eletrônicas de varredura obtidas em temperatura criogênica: a) vazio de ar preenchido parcialmente por cristais de gelo; b) vazio de ar após a sublimação dos cristais de gelo	42
Figura 17 -	Seção transversal esquemática de um corpo-de-prova de concreto submetido ao resfriamento	43
Figura 18 -	Distribuição dos vazios de ar no concreto	48
Figura 19 -	Espaçamento $\bar{s}$ entre os vazios de ar	48
Figura 20 -	Unidade de congelamento: (a) caixa térmica e conjunto de serpentinas; (b) termostato; (c) compressor; (d) condensadores	53
Figura 21 -	Ábaco de dosagem para determinação do traço do CAD para ambientes com baixas temperaturas	57
Figura 22 -	Evolução da resistência à compressão dos concretos com e sem ar incorporado desenvolvidos por Lima (2006)	59
Figura 23 -	Modelos de acelerômetros piezelétricos	61
Figura 24 -	Conversão da resposta do corpo-de-prova no domínio do tempo para o domínio da frequência	62
Figura 25 -	Conceito da Transformada de Fourier	62
Figura 26 -	Curva de resfriamento dos corpos-de-prova.	63
Figura 27 -	(a) Sistema processador de sinais para leitura da frequência natural; (b) ensaio de corpo-de-prova para determinação da frequência natural; (c) Detalhe do acelerômetro (captador de sinais); (d) Termômetro para aferição da temperatura interna do corpo-de-prova e; (e) da câmara fria	63
Figura 28 -	Curvas para obtenção da frequência natural em diversas idades para os concretos ensaiados a baixas temperaturas	64
Figura 29 -	Valores de frequência ( $n$ ) para os corpos-de-prova de concreto ensaiados à $-35^{\circ}\text{C}$ : (a) concreto de referência (b) concreto com ar incorporado ( $6\pm 1$ )	66
Figura 30 -	Frequência natural após o período de 35 dias de exposição ao congelamento	66
Figura 31 -	(a) Relógio medidor Tensotast e conjunto de barras de calibração; (b) Tensotast; (c) Corpo-de-prova instrumentado com extensômetros mecânicos	68
Figura 32 -	a) Corpo-de-prova instrumentado com as bases do extensômetro mecânico; (b) Procedimento de leitura	69

Figura 33 - Principais interfaces do concreto	75
Figura 34 - Técnicas para melhorar o desempenho das diversas interfaces no concreto	75
Figura 35 - Características das diversas fases da pasta de cimento hidratada em amostras de concreto polidas e fraturadas de concreto	80
Figura 36 - Micrografias de concreto em amostras polidas e fraturas – identificação dos vazios de ar incorporado	81
Figura 37 - EDS em linha para verificar os elementos presentes na região da pasta de cimento com e sem agregado	81
Figura 38 - Microscopia eletrônica de varredura do CAD para baixas temperaturas – a/agl 0,42; 1:m, m=5, $f_{ck} = 57$ MPa. (a) Superfície do agregado; (b) e (c) interface pasta agregado e (d) Matriz da pasta de cimento.	82
Figura 39 - Porosimetria por intrusão de mercúrio - Concretos com adição de 10% de sílica ativa em substituição volumétrica.	84
Figura 40 - Porosimetria por intrusão de mercúrio - Concretos sem adição de sílica ativa em substituição volumétrica.	85
Figura 41 - Difrátograma para amostra sem adições minerais com 28 dias de idade, (a/agl=0,4)	86
Figura 42 - Difrátograma para amostra com 10% de sílica ativa de ferro silício e 28 dias de idade (a/agl. = 0,4)	88
Figura 43 - Diferentes procedimentos de mistura avaliados, onde AM=agregado miúdo, AG=agregado graúdo, CP=cimento, SA=sílica ativa, A=água e SP=superplastificante	90
Figura 44 - Curvas ascendentes de cisalhamento dos MCAD produzidos com CPV ARI Plus e com composição variada	91
Figura 45 - Vista da sala de preparação de amostras do LMABC	95
Figura 46 - Preparação de amostras para microanálise – corte.	97
Figura 47 - Preparação de amostras – remoção de sujidades – ultra-som	98
Figura 48 - Preparação de amostras – interrupção da hidratação e dessecação da amostra	99
Figura 49 - Preparação de amostras – secagem em estufa	100

Figura 50 - Armazenamento das amostras	100
Figura 51 - Ensaio de gelo/degelo	103
Figura 52 - Microscopias eletrônicas de varredura para CAD de Lima (2006)	106
Figura 53 - Representação gráfica do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio para o concreto elaborado por Lima (2006) resistente ao congelamento – diâmetro dos poros ( $\mu\text{m}$ ) versus volume de mercúrio acumulado (ml/g)	108
Figura 54 - Variação da frequência natural para o corpo-de-prova de referência do concreto sem ar incorporado	114
Figura 55 - Variação da frequência natural para o corpo-de-prova de referência do concreto com ar incorporado	114
Figura 56 - Variação da temperatura ambiente para os corpos-de-prova de referência	115
Figura 57 - Variação da umidade relativa do ar para os corpos-de-prova de referência	115
Figura 58 - Fissuração da superfície dos corpos-de-prova submetidos ao gelo/degelo	123
Figura 59 - Ensaio de resistência mecânica em concretos com 3,5% de ar incorporado após a exposição aos ciclos de gelo e degelo: a) ensaio para obtenção do módulo de elasticidade em corpo-de-prova cúbico; b) ensaio de resistência à tração na flexão e, corpo-de-prova prismático	126
Figura 60 - Representação gráfica do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio para o concreto com 3,5% de IAR e resistente à segunda série de ensaios de gelo e degelo – diâmetro dos poros ( $\mu\text{m}$ ) versus volume de mercúrio acumulado (ml/g)	127
Figura 61 - Curvas de distribuição de poros para os concretos expostos aos ciclos de gelo e delo nas três séries de ensaios	129
Figura 62 - Microestrutura do novo concreto (CAD N) com 3,5% de ar incorporado	132
Figura 63 - Micrografias e microanálises por energia dispersiva de raios-X de concretos com 3,5% $\pm$ 1% de ar incorporado. (a) Interface pasta/agregado; (b) espectro de EDS do ponto indicado na micrografia 63.a, (c) interface pasta/vazio de ar; (d) espectro de EDS do ponto indicado na micrografia 63.c; (e) produtos de hidratação da pasta de cimento; (f) espectro de EDS do ponto indicado na micrografia 63.e.	133
Figura 64 - Tamanho médio para os poros no concreto resistente aos ciclos de gelo/degelo	137

Figura 65 - Tamanho médio para os poros do concreto resistente ao congelamento desenvolvido por Lima (2006)	137
Figura 66 - Altura da ascensão capilar da água em ensaio de absorção de água por capilaridade em corpos-de-prova ( cilíndricos com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm) de micro concreto com idade de 28 dias após 72 h de imersão em água.	141
Figura 67 - Corpos-de-prova após a ruptura do ensaio de absorção de água por capilaridade: a) referência, b) com sílica de casca do arroz e c) com sílica de ferro silício	141

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Composição do CP II E 32 a partir da análise química	17
Tabela 2 - Traços para estudo do CAD para ambientes com baixas temperaturas	59
Tabela 3 - Resistência à compressão simples para os concretos que serão submetidos à temperatura de $-35\pm 2^{\circ}\text{C}$	59
Tabela 4 - Frequência natural obtida para os corpos-de-prova para várias idades	65
Tabela 5 - Frequência transversal natural de corpos-de-prova prismáticos 10 cm x 10 cm x 50 cm após 35 dias de exposição à baixa temperatura	67
Tabela 6 - Relação entre elementos químicos obtidos em microanálises e a correspondência com o produto de hidratação do cimento Portland	81
Tabela 7 - Resultados da espectrografia por dispersão de energia (EDS) referente à figura 37	82
Tabela 8 - Símbolos para interpretação das difratometrias de raios-X nas pastas de cimento	87
Tabela 9 - Traços dos microconcretos de alto desempenho (MCAD)	91
Tabela 10 - Resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone para os microconcretos de alto desempenho. Abatimentos em [mm]	92
Tabela 11 - Resistência à compressão simples característica para os concretos a serem submetidos a ciclos de gelo/degelo	105
Tabela 12 - Dados da porosimetria por intrusão de mercúrio da amostra de CAD resistente ao congelamento	108
Tabela 13 - Frequência natural para os corpos-de-prova de concretos com e sem ar incorporado submetidos ao gelo/degelo	110
Tabela 14 - Ensaio de gelo e degelo para concreto resistente ao congelamento – Concreto sem ar incorporado - CAD Lima (2006)	112
Tabela 15 - Ensaio de gelo e degelo para concreto resistente ao congelamento – Concreto com ar incorporado - CAD Lima (2006)	113
Tabela 16 - Frequência natural após o ensaio de gelo/degelo – equilíbrio termodinâmico com o ambiente	113

Tabela 17 - Dados da porosimetria por intrusão de mercúrio da amostra danificada de concreto submetido aos ciclos de gelo e degelo	117
Tabela 18 - Concreto para ciclos de gelo/degelo - parâmetros de dosagem	119
Tabela 19 - Resistência à compressão simples para o novo traço de concreto a ser submetido aos ciclos de gelo/degelo	120
Tabela 20 - Frequências naturais dos corpos-de-prova de CAD N antes da realização do ensaio de gelo/degelo	121
Tabela 21 - Resultados do ensaio de gelo/degelo para o novo concreto com 3,5% de ar incorporado	122
Tabela 22 - Frequências naturais dos corpos-de-prova de CAD N após 48 horas do término do ensaio de gelo/degelo	122
Tabela 23 - Resistência mecânica para os concretos dosados com e sem revibração e curados em água com cal e câmara úmida	124
Tabela 24 - Resultado do ensaio de gelo e degelo para os concretos dosados com e sem revibração e curados em água com cal e câmara úmida.	125
Tabela 25 - Dados da porosimetria por intrusão de mercúrio da amostra do novo concreto com 3,5% de ar incorporado	127
Tabela 26 - Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio em amostras de concreto - VAC, VCU e RCU.	128
Tabela 27 - Espaçamento crítico entre os vazios de ar nos concretos expostos aos ciclos de gelo e degelo	130
Tabela 28 - Massa específica, índice de vazios e absorção do concreto com 3,5% de ar incorporado.	134



**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

A	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – alumina
a/agl	Relação água/aglomerante
a/c	Relação água/cimento
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABCP	Associação Brasileira do Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AFm	Monossulfoaluminato de cálcio
AFt	Trissulfoaluminato de cálcio (etringita)
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	CaO – cal livre
$\bar{C}$	CO <sub>2</sub> - dióxido de carbono
C <sub>2</sub> S	Silicato dicálcico - belita
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico - alita
C <sub>4</sub> AF	Ferroaluminato tetracálcico
CAD	Concreto de alto desempenho
CAR	Concreto de alta resistência
CH	Portlandita
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CP II E 32	Cimento Portland tipo II com adição de escória
CP V ARI PLUS	Cimento Portland tipo V de alta resistência inicial
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
EDS	Espectrografia de energia dispersiva

EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
IHE	Instrucción de Hormigón Estructural
F	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Óxido de ferro
f <sub>c28</sub>	Resistência à compressão simples do concreto aos 28 dias
Fe - Si	Liga ferro silício ou silício metálico
<i>fib</i>	Fédération Internationale du Béton
FIP-CEB	Fédération Internationale de la Précontrainte – Comité Euro-Internationale du Béton
H	H <sub>2</sub> O - água
IAR	Agente incorporador de ar
K <sub>2</sub> O	Óxido de potássio
LMABC	Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento
M	MgO - Óxido de magnésio
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MnO <sub>2</sub>	Dióxido de manganês
Na <sub>2</sub> O	Óxido de sódio
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosur
NIST	National Institute of Standards and Technology
PCH	Pasta de cimento hidratado
pH	Potencial hidrogeniônico
PIM	Porosimetria por intrusão de mercúrio
S	SiO <sub>2</sub> - Dióxido de silício
$\bar{S}$	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> - Íon sulfato

SET	Departamento de Engenharia de Estruturas
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de Titânio
USP	Universidade de São Paulo
WDS	Espectrografia por dispersão de onda

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>		<b>vi</b>
<b>ABSTRACT</b>		<b>vii</b>
<b>LISTADE FIGURAS</b>		<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>		<b>xiii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b>		<b>xv</b>
<b>PREÂMBULO</b>		<b>1</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>3</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS E JUSTIFICATIVAS	3
1.2	AS INSTALAÇÕES FRIGORÍFICAS	7
1.3	OBJETIVOS: GERAL E ESPECÍFICO	13
1.4	MÉTODO	15
<b>2</b>	<b>CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO E A SUA DURABILIDADE EM AMBIENTES COM BAIXAS TEMPERATURAS</b>	<b>21</b>
2.1	O CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	21
2.1.1	DEFINIÇÕES	21
2.1.2	PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	26
2.1.3	DESVANTAGENS DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	38
2.2	A AÇÃO DAS BAIXAS TEMPERATURAS SOBRE O CONCRETO	38
2.3	AÇÃO DOS CICLOS DE GELO E DEGELO SOBRE O CONCRETO	42
2.4	A IMPORTÂNCIA DO SISTEMA DE VAZIOS PARA O DESEMPENHO DO CONCRETO EM BAIXAS TEMPERATURAS	44
2.5	CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO PARA AMBIENTES COM BAIXAS TEMPERATURAS	52
2.5.1	DOSAGEM DO CAD PARA AMBIENTES COM BAIXAS TEMPERATURAS	53

2.5.2	ENSAIOS PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO DE CONCRETOS EM BAIXAS TEMPERATURAS	59
2.5.3	DESEMPENHO DO CAD FRENTE ÀS BAIXAS TEMPERATURAS	64
<b>3</b>	<b>A MICROESTRUTURA DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO</b>	<b>73</b>
3.1	A ARQUITETURA DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO	73
3.2	ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO A PARTIR DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTRO DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X (EDS)	76
3.3	ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO A PARTIR DE ENSAIOS DE POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (PIM)	83
3.4	ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO A PARTIR DE DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X	86
3.5	PRÁTICAS REOLÓGICAS E A MICROESTRUTURA DO CONCRETO	88
<b>4</b>	<b>INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL</b>	<b>93</b>
4.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISES MICROSCÓPICAS	95
4.2	ENSAIOS DE GELO E DEGELO EM CONCRETO	100
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>105</b>
5.1	CAD LIMA (2006) - RESISTENTE AO CONGELAMENTO	105
5.1.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE	105
5.1.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	105
5.1.3	POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (PIM)	107
5.1.4	ENSAIO DE GELO E DEGELO	110
5.1.5	ANÁLISE MICROSCÓPICA APÓS O ENSAIO DE GELO E DEGELO	116
5.2	CONCRETO RESISTENTE AO GELO E DEGELO	117
5.2.1	DEFINIÇÃO DO TRAÇO	118
5.2.2	RESISTÊNCIA MECÂNICA	120
5.2.3	ENSAIO DE GELO E DEGELO	120
5.2.4	POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO	126

5.2.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	130
5.2.6	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	134
6	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>135</b>
7	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>147</b>
8	<b>PROSSEGUIMENTO DE PESQUISA</b>	<b>150</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>151</b>
	<b>ANEXO A: Súmula da história da durabilidade em estruturas de argamassa armada e concreto armado no Brasil.</b>	<b>156</b>
	<b>ANEXO B: Dados de ensaio do concreto elaborado por Lima (2006).</b>	<b>161</b>
	<b>ANEXO C – Dados de dosagens de concretos pertencentes ao banco de dados do LMABC.</b>	<b>170</b>
	<b>ANEXO D – Resultados dos ensaios constantes na análise experimental desta pesquisa.</b>	<b>174</b>

## **PREÂMBULO**

No capítulo 1 fez-se a introdução ao tema abordado neste estudo dando ênfase a sua importância no terreno científico e econômico além dos aspectos referentes à sustentabilidade da tecnologia dos concretos de alto desempenho. Foram apresentados os objetivos gerais e específicos, bem como o método a ser seguido para o cumprimento de tais metas.

No capítulo 2 discorreu-se sobre a ação das baixas temperaturas no concreto, sendo que a dissertação de mestrado desta pesquisadora serviu como base para a elaboração deste capítulo. Serão apresentados, inclusive, os resultados obtidos quanto ao desempenho de concretos frente à ação do congelamento.

O capítulo 3 apresenta os aspectos de interesse a cerca da microestrutura para o projeto e confecção de um concreto de alto desempenho frente às baixas temperaturas, considerando, como principal fonte de pesquisa, o banco de dados do LMABC.

O capítulo 4 descreve a análise experimental proposta nesta pesquisa.

No capítulo 5 são apresentados os resultados e as interpretações dos ensaios propostos pela análise experimental delineada.

As discussões, sobre os resultados apresentados, são desenvolvidas no capítulo 6.

As conclusões são apresentadas no capítulo 7, e as propostas de prosseguimentos desta pesquisa estão apresentadas no capítulo 8.

Ao final do trabalho são apresentadas as referências bibliográficas e quatro anexos.

O anexo A trata de um breve relato sobre a história da durabilidade em estruturas de concreto e argamassa no Brasil, com o objetivo de situar o presente trabalho neste contexto mais amplo.

O anexo B apresenta os resultados de ensaios de caracterização do concreto desenvolvido por Lima (2006), que foi a base para esta nova pesquisa.

O anexo C apresenta os resultados para caracterização dos concretos de pesquisadores do LMABC que serviram de suporte para o desenvolvimento desta pesquisa.

O anexo D apresenta os resultados na íntegra e mesmo dados não tratados, a partir dos quais foram elaboradas as várias tabelas e parâmetros referentes aos concretos elaborados neste trabalho de doutorado.



## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações gerais e justificativas

O concreto tem sido inegavelmente o material mais empregado no mundo todo para a construção das mais variadas edificações, presente em obras das mais diversas tipologias.

Tecnologias inovadoras para produção de concretos aplicados aos mais adversos ambientes são objetos de estudo de muitos pesquisadores. Tais estudiosos buscam um material durável e racional, no sentido de aproveitar ao máximo os recursos naturais empregados na sua produção, tornando-o uma alternativa sustentável que ofereça vantagens tecnológicas e econômicas em relação às demais.

A sustentabilidade tem sido uma bandeira empunhada por profissionais de todas as áreas tecnológicas e científicas. A produção anual de cimento é responsável por 7,9% de toda a emissão de CO<sub>2</sub> no mundo inteiro (RESCHKE, *et al.*, 2005), fato que evidencia a necessidade da racionalização do uso deste material, e essa meta está estreitamente relacionada ao conceito de durabilidade.

Acrescenta-se, no entanto, que os cimentos Portland têm sido os materiais que mais incorporam lixos de outros setores industriais, como o aço, os entulhos, sobras vegetais, etc, sem o que teríamos fontes poluentes mais expressivas (Liborio – IBRACON – 2002)

Entende-se, por racionalização, as ações que diminuam o consumo de cimento necessário para cada 1 MPa almejado. Além disso, nessa mesma diretriz, tem de se pensar em novos cimentos, cuja produção requeira menores níveis energéticos.

As adições minerais vêm ao encontro de todas essas necessidades: menor consumo energético, reaproveitamento de subprodutos de diversas áreas outrora despejados como lixo na natureza, além de agregar durabilidade ao concreto.

O concreto de alto desempenho proposto no início dos anos sessenta, com a utilização das sílicas ativas e dos aditivos tensoativos, vem sendo amplamente aprimorado; embora, muitos esforços ainda sejam necessários para que a aplicação deste novo material alcance o campo prático nas obras, fazendo, assim, a ciência colaborar com o desenvolvimento patrimonial do país.

Para que essa tecnologia do concreto de alto desempenho torne-se prática comum na construção civil, serão necessários esforços no sentido de se atribuir a ela sua específica função no cenário da construção, ou seja, é necessário criar nichos de mercado para aplicação de concreto de alto desempenho.

Os concretos que vêm sendo ordinariamente utilizados (25 MPa a 30 MPa) ainda terão seu campo de aplicação em meios moderados; entretanto, para ambientes severos, o uso de tais concretos deve ser contestado.

O custo de produção do concreto de alto desempenho certamente será a primeira barreira a ser vencida para a fixação da sua utilização. Pensando nisso, Aïtcin (2000) argumenta que, nos dias atuais, em que a sustentabilidade é condição indiscutível, o custo dos projetos no futuro deverá incorporar não somente os custos econômicos, mas também os custos sociais e ambientais, os quais envolvem a extração da matéria-prima, sua utilização, e sua eliminação (i.e. ao final da vida útil); passando, então, ser necessário proceder à análise do ciclo de vida desse produto na natureza.

Vários pesquisadores têm discorrido, já há décadas, sobre as técnicas desenvolvidas no campo do concreto de alto desempenho e sobre sua potencialidade em colaborar com a indústria da construção. Se por um lado, o desenvolvimento da ciência dos materiais criou um

senso de satisfação na comunidade de cientistas, há também a decepção ao se constatar a enorme distância entre a tecnologia e a prática.

Tendo por base essas constatações, esta pesquisa cria um novo nicho para o concreto de alto desempenho: sistemas de armazenagem sob baixas temperaturas.

A base científica para o desenvolvimento deste trabalho está calcada na linha de pesquisas elaboradas a partir de 1989 pelo grupo de pesquisadores do Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento da EESC, USP<sup>1</sup>.

A partir da observação dos resultados dessas pesquisas, pode-se assim estabelecer técnicas de dosagem, métodos de análise de materiais, correção das deficiências dos constituintes de uma mistura, a escolha destes materiais e montagem dos aglomerantes de acordo com o emprego do concreto ou argamassa de cimento Portland, etc.

A pesquisa aqui traçada propõe uma maneira eficaz de se projetar concretos duráveis frente a ambientes com baixas temperaturas. A aplicação correta dessa técnica permite a superação de quaisquer adversidades impostas pelo meio ambiente ou pelas condições de uso<sup>2</sup>. Desse modo esta pesquisa faz a avaliação dos conhecimentos existentes a respeito do CAD para aplicação específica na temática proposta.

Outrossim, observou-se a total ausência de pesquisas até mesmo literatura sobre concretos para baixas temperaturas no Brasil, sendo a Dissertação de Mestrado da mesma autora (LIMA, 2006) a única fonte no país que descreve detalhadamente os mecanismos de ação do congelamento e de baixas temperaturas sobre elementos de concreto.

Uma ampla linha de pesquisa, traçada desde 1992 pelo Prof. Jefferson B. L. LIBORIO direcionada aos estudos sobre a durabilidade de concretos e argamassas estruturais vem ao encontro dessas expectativas. Vários estudos que privilegiam a importância de novos

---

<sup>1</sup> Leia mais sobre esta trajetória de pesquisa em súmula apresentada no Anexo A deste trabalho.

<sup>2</sup> Leia mais sobre a prática do concreto de alto desempenho em Lima, S. M. DE (2006).

materiais na fabricação desses concretos foram realizados, considerando a importância da introdução da sílica ativa de origens diversas; incorporação de outras adições; a ação da carbonatação, dos cloretos, e de outros agentes agressivos; o desenvolvimento e aplicação de processos industriais na produção de pré-moldados, dos pisos industriais; continuidades e reparos em estruturas de concreto. A partir desses estudos, outros de vários níveis foram desenvolvidos. Somados a esses trabalhos, outros importantes realizados por diversos centros de pesquisa foram determinantes na construção dos conhecimentos para esta pesquisa.

Além de reunir os conhecimentos adquiridos, este trabalho é uma continuidade da pesquisa já iniciada dentro do grupo do LMABC, e que possibilitou a Dissertação de Mestrado desta mesma pesquisadora, sob o título “Concreto de alto desempenho para ambientes com baixas temperaturas”. Esse prosseguimento de pesquisa permitiu a investigação do comportamento dos concretos de alto desempenho voltados para a aplicação em ambientes com baixas temperaturas, destinados à armazenagem, guarda e processamento de alimentos.

A conservação de alimentos que se utiliza dos processos de refrigeração e congelamento é primordial para a viabilidade do crescimento populacional, pois possibilita a estocagem adequada, bem como o intercâmbio de gêneros alimentícios perecíveis entre os mais distantes pontos do território nacional e mundial. Permite, ainda, o controle de estoque em casos de safra e entressafra dos produtos.

A carência de materiais efetivamente duráveis para a construção de sistemas para armazenamento e conservação de gêneros alimentícios, com uma relação custo/benefício vantajosa em comparação às demais alternativas, constitui um inaceitável contra-senso, se analisada a importância da cadeia do frio para um país como o Brasil, genuinamente agrícola e detentor de 33% do mercado mundial de carnes.

A produção brasileira de carne bovina cresceu 40% nos últimos sete anos, e a produção de carne de aves duplicou. Essa fatia de mercado rendeu, ao Brasil, 4,5 bilhões de dólares em exportações no ano de 2007 (figura 1) (GRADILONE; MARTINO, 2008.)

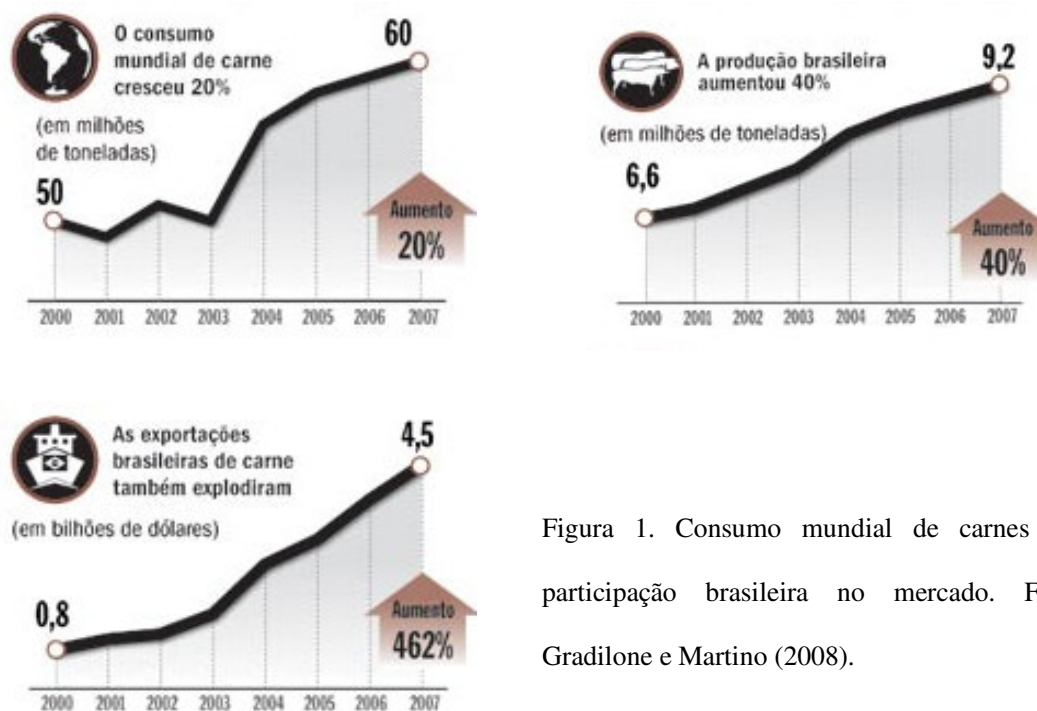


Figura 1. Consumo mundial de carnes e a participação brasileira no mercado. Fonte: Gradilone e Martino (2008).

## 1.2 As instalações frigoríficas<sup>3</sup>

As instalações frigoríficas, ou de outras indústrias alimentícias, onde a climatização dos ambientes em baixas temperaturas se faz necessária, são projetadas seguindo dois aspectos referentes à sua funcionalidade: o isolamento térmico e a sanitização dos ambientes. O método construtivo e os materiais utilizados devem atender a estas necessidades.

Ordinariamente, tais instalações adotam sistemas construtivos que permitem agilidade e rapidez na construção de suas instalações, tais como, estruturas pré-moldadas em concreto

<sup>3</sup>As informações contidas nesta seção são baseadas na experiência profissional da autora, responsável pela construção de mais de 15000 m<sup>2</sup> de instalações frigoríficas.

ou estruturas mistas, com a superestrutura em concreto pré-moldado e a cobertura em estrutura metálica.

O sistema de vedação interna e externa destas instalações é constituído por painéis isolantes, tipo sanduíche, compostos por duas chapas metálicas com tratamento galvanizado e pintura eletrostática epóxi, separadas por uma camada de poliuretano injetado, com densidade mínima de 35 kg/m<sup>3</sup>. As espessuras destes painéis dependem da inércia térmica a ser mantida em cada ambiente. Esse parâmetro depende do volume interno do ambiente, da quantidade de calor emitida por equipamentos e funcionários, da carga a ser armazenada, no caso de câmaras de estocagem, e da potência dos equipamentos de climatização.

Os painéis sanduíches são utilizados para as vedações verticais (paredes) e horizontais (teto). Os painéis de fechamento vertical são apoiados diretamente no piso e são estruturais, ou seja, dispensam a necessidade de pilares e vigas para se sustentarem, sendo seu contraventamento garantido pelo travamento com painéis horizontais de forro, os quais são fixados na estrutura de cobertura da edificação.

Por vezes estes painéis verticais são protegidos por alvenarias de blocos de concreto até a altura de 110cm do piso, com a finalidade de evitar danos por impactos de empilhadeiras, paletizadoras, poltrizes de limpeza, etc.

Alguns cuidados especiais são tomados para completa vedação de frestas e encaixes dos painéis junto às estruturas, alvenarias, forros e pisos.

Os pilares em concreto expostos a ambientes com temperaturas de até 0°C são revestidos com estes painéis até a altura de 110cm e acima são revestidos com pintura epoxídica, com cobertura mínima de 500 micras.

Já nos ambientes com temperaturas inferiores a 0°C, os pilares são isolados com os painéis ora descritos.

As vigas de cobertura ficam em nível acima do painel isolante de forro, não recebendo, assim, a ação da climatização dos ambientes.

Os pisos dos ambientes com temperaturas entre  $0^{\circ}\text{C}$  e  $-10^{\circ}\text{C}$  são compostos por duas lajes de concreto intercaladas por uma camada de painéis de espuma de poliuretano de alta densidade. Entre a primeira laje e os painéis de poliuretano, há uma rigorosa barreira impermeável constituída de pintura betuminosa, e manta de papel alumínio e feltro asfáltico.

A figura 2 ilustra um painel isolante e o esquema construtivo de paredes e pisos de indústrias frigoríficas.

Para os ambientes com temperaturas inferiores a  $-10^{\circ}\text{C}$ , além do procedimento supracitado, são construídos drenos longitudinais por toda a extensão do leito de apoio (i.e. terreno) da primeira laje de concreto, a fim de coletar a água resultante da condensação ocorrida na interface laje/solo.

O processo de sanitização dos ambientes é feito por meio de lavagem com água a  $60^{\circ}\text{C}$  e com produtos de limpeza à base de ácido clorídrico em solução.

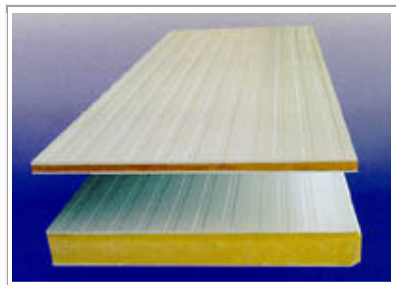
Com a descrição dessas instalações, conclui-se que as estruturas de concreto dos pisos dos ambientes são as mais afetadas pelas condições de baixas temperaturas e sanitização, admitindo-se que as demais sejam devidamente protegidas dessas cargas funcionais.

As solicitações mecânicas também são elevadas e chegam a cargas da ordem de 25  $\text{kN/m}^2$  a 50  $\text{kN/m}^2$ , devido aos produtos estocados e ao trânsito de equipamentos.

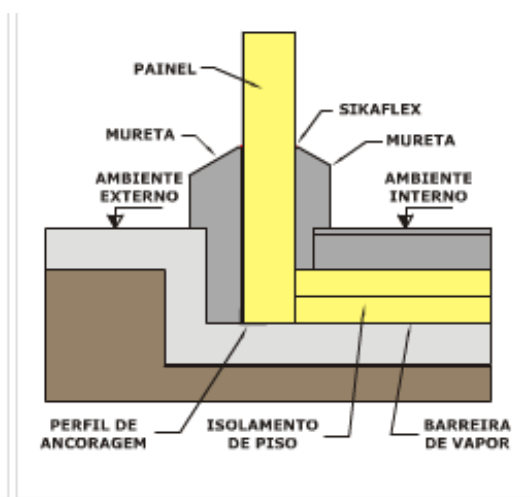
Para as indústrias que dependem da tecnologia do frio para manuseio, estocagem e armazenamento de seus produtos, seguramente a deterioração das instalações são causadoras de consideráveis prejuízos.

Além dos gastos com a manutenção propriamente dita das construções, os quais no cenário geral é o de menor custo, a paralisação da fábrica equivale a grandes desperdícios de horas-homem e de produção. Há ainda os prejuízos com embargos sofridos pelos órgãos

fiscalizadores ou pelos próprios clientes que, em auditorias, podem detectar condições inadequadas à perfeita sanitização das instalações.



a) Exemplo de painel isolante do tipo sanduíche – composto por chapas galvanizadas e espuma de poliuretano de alta densidade.



b) Corte esquemático do sistema construtivo para isolamento de piso e parede em ambientes climatizados de indústrias frigoríficas.

Figura 2. Detalhes do sistema construtivo de ambientes climatizados: (a) painel isolante; (b) corte esquemático do painel de vedação vertical e piso de um ambiente climatizado. Fonte: [http://www.recrusul.com.br/ff\\_copai.asp](http://www.recrusul.com.br/ff_copai.asp)

Mesmo as mais modernas indústrias deste setor não têm acesso à tecnologia para construção de suas instalações fabris de maneira a evitar paralisações necessárias para a realização de manutenção. Os materiais disponíveis em mercado para construção dessas fábricas, com maior ênfase na elaboração de pisos, não resistem ao sistema de sanitização, tampouco às agressividades específicas, tais como: baixas temperaturas, sangue, sal, ácido acético, ácido graxo, etc.



Exemplificando-se, a figura 3 ilustra a quantidade de operários participantes no processo de industrialização da carne bovina, em condições já de baixa temperatura.



Figura 3. Vista da rotina num setor de desossa de um frigorífico. Fonte: Lima e Liborio (2006)

Nota-se que as fábricas têm inicialmente pisos projetados (figura 4) em concreto; no entanto, o que se observa é a deterioração precoce desses pisos. Com isso, os pisos são revestidos com camadas protetoras como tintas epoxídicas ou revestimentos à base de poliuretano.

As cerâmicas também são alternativas empregadas para estes ambientes. Todavia, tanto os revestimentos, inclusive os cerâmicos, como as tintas não oferecem as características necessárias para tais ambientes, como facilidade de sanitização, propriedade antiderrapante, aderência ao substrato, durabilidade frente a ataques químicos, etc., além de serem extremamente onerosos.

O histórico relatado da construção desse piso corrobora para a constatação de que não há prática de conceitos básicos e fundamentais para projeto e execução desses elementos, mormente no projeto do material concreto.

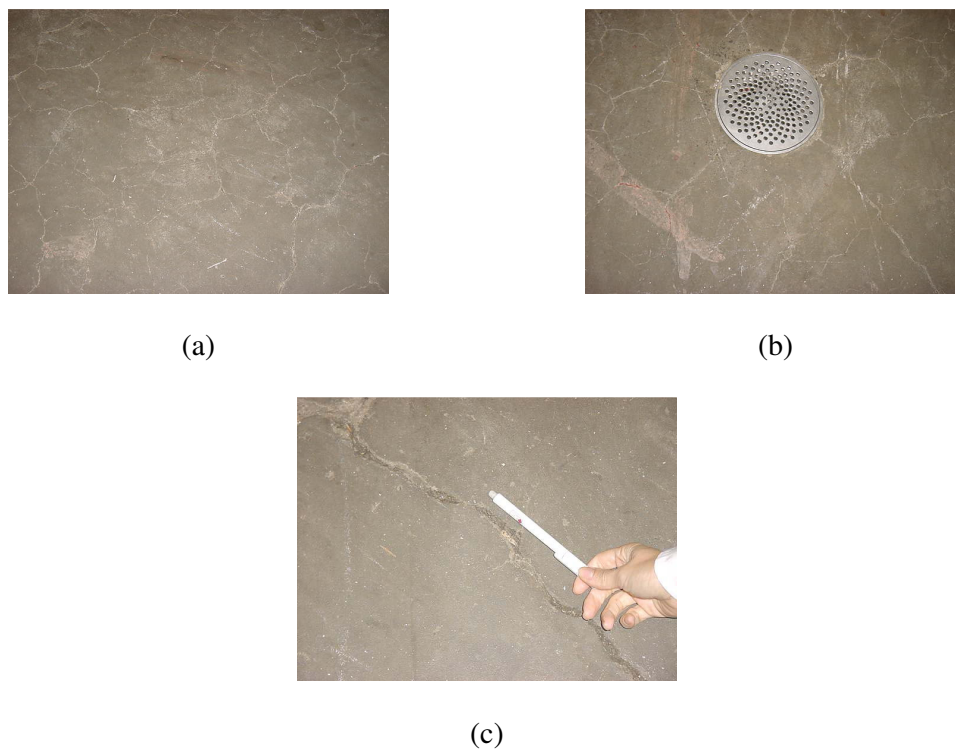


Figura 4. Detalhes do piso em um frigorífico com tempo de utilização de 18 meses. (a) Fissuração em rede atingindo toda a extensão do piso; (b) Estado mais intenso de deterioração nos caminhos preferenciais de água; presença de sangue nas fissuras colaborando para contaminação do ambiente; (c) Grandes fissuras já reparadas. Fonte: Lima e Liborio (2006)

Pela observação, constata-se que são negligenciados processos de cura, escolha do aglomerante, compatibilização de aditivos, caracterização de agregados, controle de qualidade, etc. Outro fato alarmante trata-se do consumo de cimento Portland que chega a alcançar índices de 12 kg de cimento/MPa, enquanto a boa prática, já comprovada por Lima (2006), permite projetar concretos de alto desempenho para ambientes com baixas temperaturas, com consumo de 6 a 8 kg de cimento/MPa.

Tais considerações já são o bastante para caracterizar a incoerência de se utilizar concretos comuns em tais ambientes e a premente necessidade de uma alternativa construtiva para sistemas de armazenagem, estocagem e produção em ambientes com baixas temperaturas.

### 1.3 Objetivos: geral e específico

O objetivo geral desta pesquisa é contribuir para a construção de instalações duráveis que atendam às indústrias que se utilizam da tecnologia do frio para processar e armazenar seus produtos. Com isso, almeja-se o fomento tecnológico na construção civil por meio da atribuição de nichos de aplicação das tecnologias desenvolvidas em laboratório, principalmente aquelas relativas aos concretos de alto desempenho, o que abreviará a longa distância entre a prática da ciência e os canteiros de obras.

O objetivo específico desta pesquisa é indicar a dosagem de concreto aplicável aos mais variados elementos construtivos de plantas industriais, cujos ambientes são submetidos a baixas temperaturas, tendo como base os estudos já iniciados pela autora em sua dissertação de mestrado (LIMA, 2006).

Estratégias para atingir esses objetivos:

- Serão estudados especialmente, os fenômenos físicos causadores dos danos aos concretos submetidos a congelamento sem a presença de umidade e concretos submetidos a ciclos de gelo e degelo. Esta última condição de exposição refere-se às situações em que os elementos são submetidos à baixas temperaturas e, por conta de processos de sanitização com água a temperaturas elevadas, (i.e., 60°C) ficam sujeitos a um aquecimento, o que os expõe a ciclos de gelo e degelo.

Essas duas condições simulam as possíveis situações ou adversidades às quais são submetidos os elementos construtivos em uma planta frigorífica ou em qualquer outra indústria que se utiliza da tecnologia do frio.

Não serão abordados aspectos referentes ao projeto estrutural dos elementos; entretanto, por experiência desta autora, os concretos serão dosados de modo a desenvolverem resistência à compressão com valores entre 40MPa e 50MPa, os quais atendem às solicitações

mecânicas das cargas funcionais referentes à trânsito de equipamentos, à estocagem de produtos, e à carga ambiental referente ao peso próprio das estruturas.

- Há que se ressaltar o enfoque de durabilidade que será estudado neste trabalho, ou seja, as solicitações impostas ao material concreto devido à ação do congelamento da água intersticial nele contida e por vezes processos sucessivos de congelamento e descongelamento dessa água.

Este enfoque está calcado em observações feitas pela autora em várias plantas industriais nas quais os elementos de concreto de ambientes sob baixas temperaturas ( $0^{\circ}\text{C}$  a  $-35^{\circ}\text{C}$ ) apresentaram manifestações patológicas precoces, principalmente nos pisos, enquanto os elementos de ambientes com temperaturas mais elevadas não apresentaram fenômeno semelhante. Relata-se que os elementos observados foram executados sob as mesmas condições, com o mesmo material e solicitados pelas mesmas cargas mecânicas, diferenciando-se unicamente pela condição de exposição térmica.

- Os estudos são referentes à faixa de temperatura de  $-35^{\circ}\text{C}$  até  $25^{\circ}\text{C}$ , por se tratar da condição térmica dos ambientes climatizados em plantas frigoríficas.
- Serão analisados os aspectos referentes à resistência mecânica e durabilidade do material concreto, relacionando-os à - superação das agressividades impostas pelo ambientes com baixas temperaturas e à qualidade da microestrutura do concreto dosado. Micrografias eletrônicas de varredura e ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram as ferramentas básicas para a caracterização, entendimento e aprimoramento do CAD projetado no mestrado desta pesquisadora, o qual foi resistente ao congelamento, e para o novo projeto de dosagem de concreto resistente a ciclos de gelo e degelo.

## 1.4 Método

Este trabalho é a continuidade da pesquisa iniciada por Lima (2006), com ênfase no estudo dos seguintes tópicos:

- i. Estudo da microestrutura que propiciou o entendimento da ação do congelamento sobre o concreto, e a identificação de parâmetros tais como: porosidade, fissuração, produtos de hidratação, a partir dos quais foi avaliada a eficiência das técnicas empregadas na produção e dosagem do concreto;
- ii. Estudo do comportamento do concreto sob baixas temperaturas e submetido à ação de umidade, a qual provocará situações de gelo e degelo.

As técnicas indiretas para estudo da microestrutura utilizadas para identificação das fases em amostras de concreto foram: difração de raios-X (EDS), porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

O método adotado consistiu em uma revisão bibliográfica sobre os aspectos microestruturais do concreto de alto desempenho, mecanismos de deterioração do concreto frente à ação do congelamento e de ciclos de gelo e degelo, comportamento reológico a partir do qual se podem implantar, durante a sua dosagem, medidas que favoreçam as características necessárias ao bom desempenho frente à condição de baixa temperatura.

As normalizações consideradas são as estabelecidas pelas entidades relacionadas:

- 1) Federação Internacional para Concreto Estrutural (*fib*): máxima relação  $a/agl = 0,45$ ; classe de resistência mínima – C30/37; consumo mínimo de cimento –  $340 \text{ kg/m}^3$ ; teor mínimo de ar incorporado de – 4%. Estas especificações correspondem à classe de agressividade ambiental XF4 – ataque por gelo e degelo, na condição saturada e na presença de agentes degelantes ou água do mar.

- 2) Instruções para o Concreto Estrutural (*EHE*): máxima relação  $a/agl = 0,50$ ; classe de resistência mínima – C30; consumo mínimo de cimento  $325 \text{ kg/m}^3$ ; teor mínimo de ar 4,5%. Estas especificações correspondem à classe de agressividade ambiental F – ataque por gelo e degelo na presença de sais e/ou agentes degelantes.
- 3) Instituto Americano do Concreto (*ACI 318-83*<sup>4</sup>): máxima relação  $a/agl = 0,45$ , para obras como meio-fios, calhas e corrimãos e 0,50 para outros elementos. (MEHTA e MONTEIRO; 1994).

O concreto investigado na fase experimental teve as mesmas características do concreto avaliado no mestrado da autora, cuja relação água/aglomerante ( $a/agl$ ) foi de 0,42 e a relação 1:m, (i.e. uma parte de cimento para a soma das partes de agregados graúdo e miúdo)  $m = 5$ , sendo tais parâmetros definidos a partir da análise do ábaco de dosagem concebido por Helene; 1997 (Figura 5).

A resistência à compressão almejada foi de 40MPa a 50MPa, baseada nas necessidades das instalações frigoríficas discutidas na seção 1.2.

O CAD proposto foi constituído pela fase cimentícia composta por cimento Portland CP II E 32 e sílica ativa proveniente da fabricação de ligas de ferro-silício ou silício metálico (SA), os agregados miúdo e graúdo são da região de São Carlos/SP, respectivamente: areia de rio, e de rochas de natureza basáltica com dimensão máxima de 19 mm. Os aditivos utilizados foram dos tipos: superplastificante e incorporador de ar.

---

<sup>4</sup> AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Building Code Requirements for Reinforced Concrete: reported by ACI Committee 318. In: \_\_\_\_\_. ACI Manual of Concrete Practice. Detroit, 1992. Part 3.

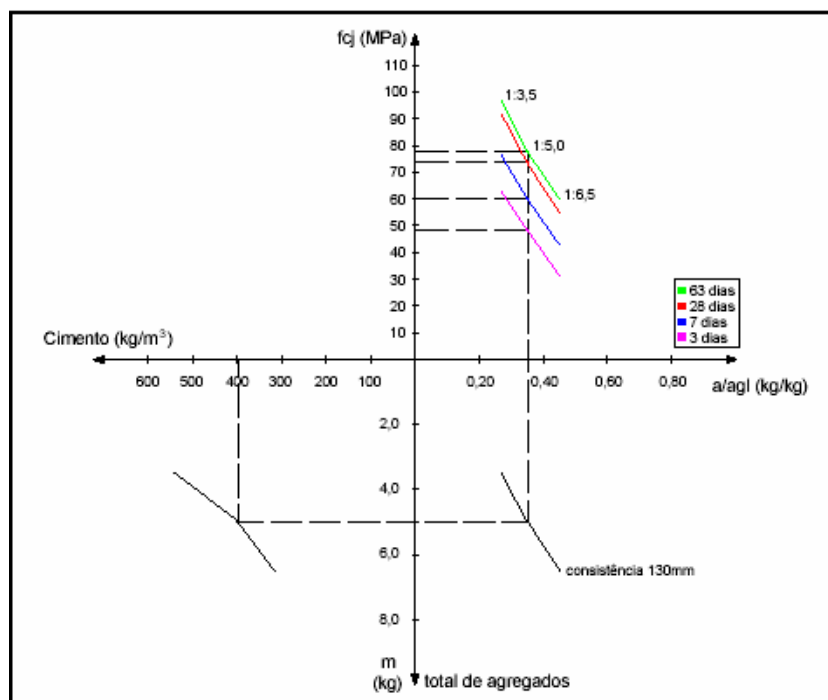


Figura 5. Exemplo de ábaco de dosagem de concreto. Fonte: Liborio & Catoia (2003).

O cimento Portland CII E 32 foi escolhido para o projeto pelas razões que seguem:

- 1) Os ambientes de armazenamento de gêneros alimentícios estão constantemente submetidos a rigorosos processos de sanitização industrial. A adição de escória no cimento consumirá o CH produzido, componente de maior solubilidade e, portanto, maior fragilidade em relação aos produtos utilizados na sanitização;
- 2) O baixo calor de hidratação é uma vantagem em se tratando de estruturas industriais com grandes volumes de concreto, minimizando os efeitos da retração;
- 3) A forma do silicato tricálcico -  $C_3S$  favorece a incorporação de ar no concreto, portanto a constituição química do CP II E 32 (tabela 1) é conveniente para esta pesquisa.

Tabela 1 – Composição do CP II E 32 a partir da análise química

Composto do CP II E 32	Porcentagens (%)
$C_2S$	20,0
$C_3S$	56,7
$C_3A$	10,1
$C_4AF$	5,6

Fonte: Lima (2006)

Uma vez que as estruturas industriais com esta finalidade não são solicitadas em prazos inferiores há 30 dias, a utilização de um cimento com velocidade de hidratação lenta, porém com alto teor de escória para consumo do hidróxido de cálcio, torna-se mais vantajoso para este projeto.

Com a base teórica constituída, serão realizadas investigações microestruturais no concreto elaborado por Lima (2006), o qual foi resistente em condições de exposição à temperatura de até  $-35^{\circ}\text{C}$  (i.e. somente congelamento).

Foram simulados ciclos de gelo e degelo, aos quais serão submetidos os concretos com e sem ar incorporado (LIMA, 2006).

A dosagem do concreto para aplicação em ambientes submetidos a ciclos de gelo e degelo teve os mesmos parâmetros de projeto, sendo que, após a verificação da sua durabilidade sob estas condições, foram feitas as adequações no seu traço.

O alto desempenho do concreto foi atribuído quando o fator de durabilidade ao gelo e degelo, determinado segundo a ASTM C666 – *Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing*, fosse igual ou superior a 80%. Nestas condições, demonstrou-se demonstraram-se os fatores que garantem a durabilidade do concreto frente à ação de baixas temperaturas, a saber: a qualidade da matriz da pasta de cimento devido a sua resistência à pressão hidráulica, causada pelo congelamento da água contida no concreto; a constituição de um sistema de poros adequado em relação ao volume e ao espaçamento entre seus vazios.

O fator de durabilidade ao gelo e degelo, bem como, a verificação da durabilidade do concreto ao congelamento, foram determinados com base em medições da frequência natural dos corpos-de-prova<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> A seção 2.5 apresentará a definição de frequência natural e sua correlação com a durabilidade do concreto.



Os aparatos para os ensaios do concreto a ciclos de gelo e degelo estão ilustrados na

Figura 6.



a) Conjunto de equipamentos para realização dos ensaios de gelo e degelo



b) Conjunto de equipamentos que contém o sistema de aquisição de dados para determinação da frequência natural dos corpos-de-prova



c) Interior da câmara fria



d) Interior da caixa para degelo dos corpos-de-prova

Figura 6. Equipamentos utilizados na realização dos ensaios de gelo e degelo dos corpos-de-prova de concreto.

A figura 7 ilustra o organograma do método adotado para o desenvolvimento desta pesquisa.

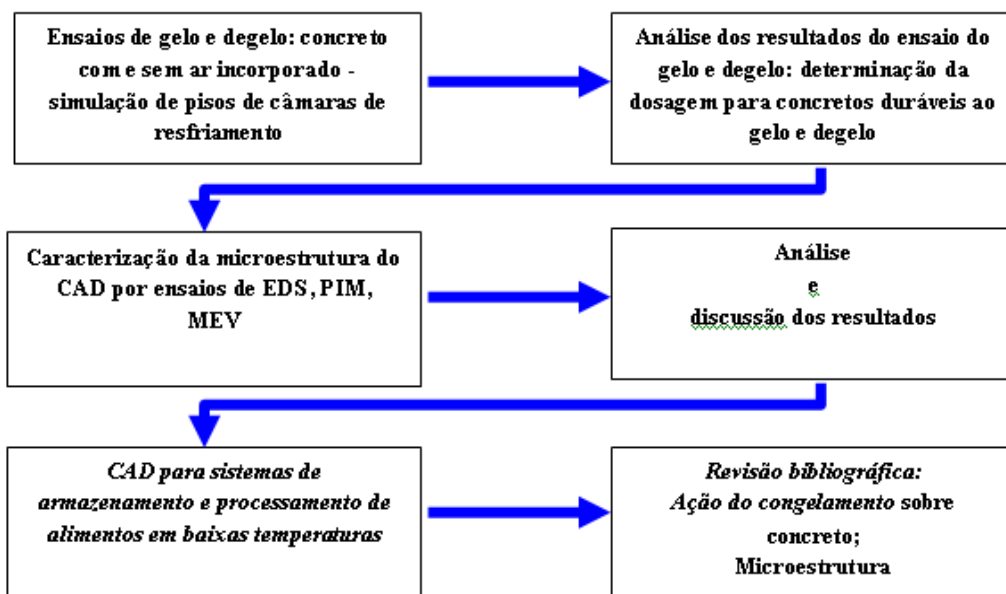


Figura 7. Organograma do método adotado para a pesquisa de CAD aplicado a sistemas de processamento e armazenamento de alimentos em baixas temperaturas.

## **2 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO E A SUA DURABILIDADE EM AMBIENTES COM BAIXAS TEMPERATURAS**

### **2.1 O concreto de alto desempenho**

#### **2.1.1 Definições**

O CAD é definido por diversas entidades respeitadas, considerando vários parâmetros tais como: relação  $a/agl$ ; resistência à compressão, fatores de trabalhabilidade, durabilidade ao gelo e degelo entre outros. A seguir, uma coletânea desses conceitos é apresentada:

De acordo com o STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (SHRP), um concreto, para ser considerado de alto desempenho, é necessário que apresente resistência à compressão em 4h, 24h e 28 dias de 20, 35 e 70 MPa, respectivamente. A relação  $a/agl$  deve ser limitada em 0,35 e o fator de durabilidade aos ciclos de gelo e degelo deve ser maior que 80%. As definições do SHRP, no que se refere à resistência, durabilidade e características da mistura foram desenvolvidas para construção de pavimentos rodoviários.

O National Institute of Standards and Technology/ American Concrete Institute NIST/ACI define o CAD como um concreto que apresenta propriedades e uniformidade que não podem ser obtidas rotineiramente utilizando apenas constituintes, misturadores normais e lançamento convencional. Eles necessitam de práticas de cura especiais. Como exemplos dessas propriedades especiais do CAD, têm-se:

- 1) fácil lançamento e compactação sem segregação;
- 2) propriedades mecânicas melhoradas a longas idades;

- 3) altas resistências mecânicas nas primeiras idades;
- 4) alta dureza superficial;
- 5) estabilidade volumétrica;
- 6) vida útil longa em meios ambientes severos.

A UNIVERSIDADE DE TÓQUIO atribui, ao CAD, à função de um “concreto compensador” das práticas de pouca qualidade nas construções e nos detalhes construtivos e, que, por si só, promova as seguintes propriedades:

- 1) capacidade de preencher as formas com pouco ou nenhum esforço externo de compactação (auto adensável);
- 2) apresentar mistura coesiva com baixa segregação;
- 3) causar pouquíssimas fissuras nas pequenas idades devido à retração e deformações térmicas;
- 4) resistência mecânica suficiente a longas idades e baixa permeabilidade;

Essa definição é um reflexo de que os japoneses enfatizam: que tanto as facilidades de construção, quanto a resistência e a durabilidade do concreto devem ser evidenciadas.

O PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE descreve o CAD como um concreto, com ou sem sílica ativa, que tem relação  $a/agl < 0,38$ , resistência à compressão acima de 55,2MPa e permeabilidade menor que 50% (medida pelos métodos AASHTO T-259 ou T-277) daquela apresentada pelas misturas convencionais.

O CIVIL ENGINEERING RESEARCH descreve as propriedades necessárias a um CAD. Entre elas podem ser citadas: a facilidade de lançamento e compactação, e altas resistências em pequenas idades. A definição consiste também na apresentação de algumas diferenças entre o CAD e o concreto convencional, tais como:

- 1) Maior resistência mecânica a longas idades e resistência à abrasão ou carga de impacto;
- 2) Menor permeabilidade;
- 3) Melhor estabilidade de volume e de forma;
- 4) Maior durabilidade a: ataque químico, exposição a ciclos de gelo e degelo e altas temperaturas;

Liborio (2003) enumera os diversos tipos de concretos de alto desempenho de acordo com a classificação das seguintes entidades:

Definições e tipos de CAD para o “STRATEGIC HIGHWAY PROGRAM”:

- a) VES (*very early strength*) – altíssima resistência em pequenas idades – O concreto deve apresentar resistência de 21 MPa à idade de 4 horas após o seu lançamento. A cura, após o período de 4h, não está terminada e a sua continuidade é benéfica. Este concreto é entendido como aquele que será necessário para realização de reparos e que apresenta essas propriedades para permitir tráfego em tempo mínimo;
- b) HES (*high early strength*) - alta resistência em pequenas idades – Esse concreto deve apresentar resistência mínima de 34MPa para idade de 24h. Quando usado em construção de pavimentos, esse concreto pode ser lançado por máquinas e recebe pouca ou nenhuma cura além de 24h;
- c) HS (*high strength*) – alta resistência - Concreto com  $f_{c28} > 42\text{MPa}$ ;
- d) VHS (*very high strength*) – altíssima resistência aos 28 dias – O concreto VHS deve apresentar resistência mínima de 69MPa nessa idade. Esse concreto é especificado quando a capacidade estrutural seja uma consideração primária. A cura prolongada é então necessária para que se obtenha resultados ótimos;
- e) FRC (FIBER-REINFORCED CONCRETE) – concreto armado com fibras – O concreto armado com fibras deve proporcionar uma ductilidade ou tenacidade iguais a

pelo menos cinco vezes a área sob a curva tensão-deformação para um mesmo concreto sem fibras. As fibras geralmente são associadas à tenacidade (capacidade de absorver energia). Essa absorção de energia ocorre primariamente após a resistência última do concreto.

f) CONCRETO DE ALTA DURABILIDADE – é um concreto com um fator de durabilidade mínimo (gelo e degelo) de 80%, como medido pela AASHTO T161 (método A) ou ASTM C 666, e uma relação a/c < 0,35kg/kg. A relação a/c máxima de 0,35 promove uma pasta com um sistema capilar descontínuo após um pequeno período de cura (normalmente em torno de 1dia). Isto permite desenvolver uma resistência à penetração de umidade e ataque químico do meio ambiente.

g) CONCRETO LEVE DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR) – É o concreto produzido com agregados leves, como argila expandida, xisto, gizes, que reduzem a massa de 20% a 25% abaixo do concreto convencional e que apresentam resistência maior que 69MPa. Esse tipo de concreto é desejável onde haja necessidade de redução de carga permanente.

Definições francesas do CAR:

Os pesquisadores franceses DE LARRARD & BOSTVIRONNOIS (1991), distinguem os concretos de alta resistência daqueles de altíssima resistência como a seguir:

a) CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA – Concreto que contém aditivos químicos, principalmente para redução de água e apresenta resistência entre 50MPa e 80MPa;

b) CONCRETO DE ALTÍSSIMA RESISTÊNCIA - Concretos que contem aditivos químicos como anteriormente, mais material pozolânico finamente graduado, como a sílica ativa, e tem resistência mecânica superior a 80MPa.

Definições do CAR para o ACI (American Concrete Institute):

O comitê ACI 363/1992 define o concreto de alta resistência como “o concreto que tem resistência à compressão especificada de 41MPa ou maior, e exclui concretos feitos utilizando materiais e técnicas exóticas”. A palavra “exótica” refere-se a materiais como concreto com impregnação de polímero, concreto epóxi, e concreto com agregados leves normais ou artificiais.

Definição do CAR da FIP - CEB (1990):

*A Federation Internationale de la Précontrainte-Comité Euro-International du Béton - FIP-CEB Working Group (1990), define o CAR como a seguir:*

Concretos com uma resistência a compressão simples, medida em corpos-de-prova cilíndricos acima dos limites apresentados em vários códigos nacionais, isto é 60 MPa, e até 130 MPa, os limites estabelecidos com agregados ordinários.

Neste caso, o conceito de CAD mais do que estar ligado a parâmetros de resistência mecânica, valores para relações  $a/agl$ , utilização de materiais e técnicas alternativas, está relacionado à excelência em atender às necessidades projetadas durante sua vida útil pré estabelecida, dentro das tolerâncias de custo benefício para sua elaboração.

Liborio (2003) ilustra seu ponto de vista sobre CAD na Figura 8 relacionando-o à durabilidade.

Com base nestes conceitos Liborio (2003) elaborou a seguinte definição para o CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO:

“...O concreto de alto desempenho deve ser entendido como um material, cientificamente produzido, que atende as expectativas do cliente do ponto de vista estrutural, da estética, de durabilidade frente ao meio ambiente atual e futuro, para fins pré-determinados. Deve ser econômico (custo/benefício) e propiciar vantagens frente a outras alternativas tecnológicas...”.

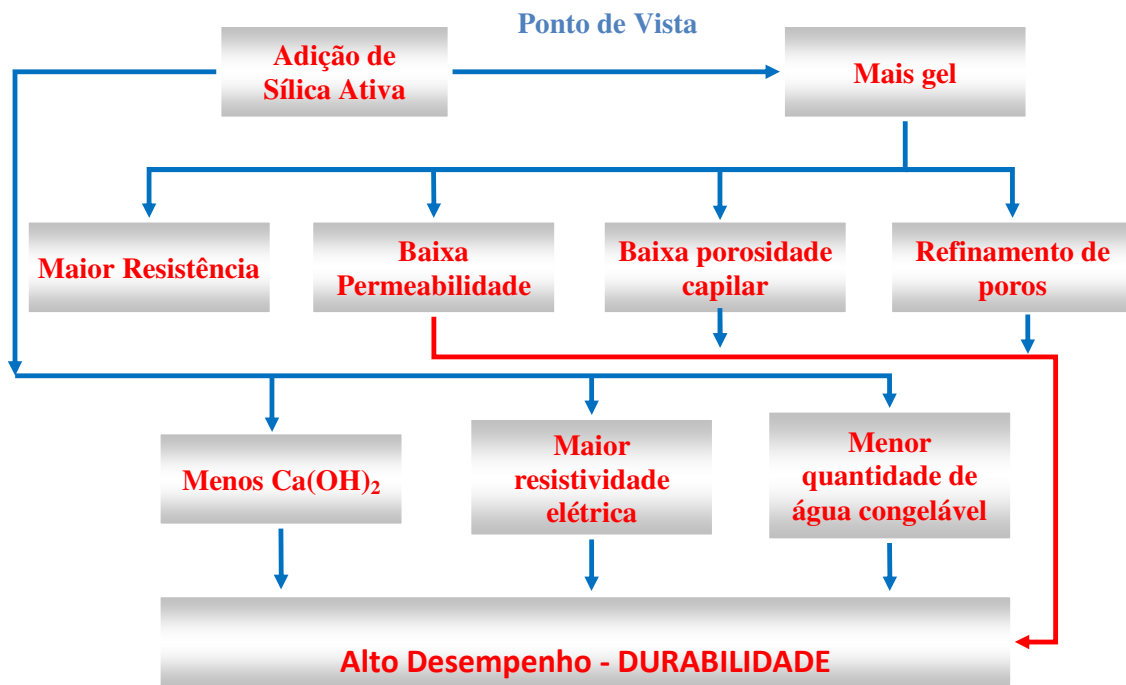


Figura 8. Elaboração de concretos estruturais de alta durabilidade. Fonte: Liborio (2003).

Lima (2006), tendo como critério a definição de CAD proposta por Liborio (2003), definiu o concreto de alto desempenho para ambientes com baixas temperaturas, como sendo aquele produzido cientificamente para atender as condições de agressividade impostas pelo meio, mormente às baixas temperaturas, e as solicitações relativas à utilização (i.e. trânsito de equipamentos, carga de armazenagem, ataques químicos). Além disso, esse concreto deve ser vantajoso em relação às alternativas construtivas por conta de uma relação custo/benefício atrativa, pautada nos gastos de produção do concreto, bem como na durabilidade dos elementos construtivos.

### 2.1.2 Propriedades do concreto de alto desempenho

Neville (1997) refere-se ao concreto de alto desempenho como sendo uma evolução dos concretos comuns composto por: agregados comuns de boa qualidade;



cimento Portland comum, ou cimento de alta resistência inicial quando for pertinente à situação; sílica ativa, na proporção de 5% a 15% em massa em relação ao total de material cimentício; sendo possível a composição do aglomerante com outros materiais cimentícios, tais como cinza volante ou escória granulada de alto forno, e sempre um superplastificante. Neville (1997) completa dizendo que o “... concreto de alto desempenho é uma evolução lógica do concreto com sílica ativa e superplastificante”.

Aïtcin (2003) relata que o concreto de alto desempenho pode ser produzido somente com um tipo de cimento ou uma combinação de aglomerantes de modo a otimizar o efeito aglomerante pela sinergia de vários materiais como: escória de alto forno, cinza volante, fumo de sílica, metacaulinita, cinza da casca do arroz e fíler (calcário pulverizado).

O entendimento da tecnologia do CAD requer uma revisão da evolução das leis propostas por Féret, Abrams e Powers para o comportamento mecânico, além da estrutura química e da reologia do concreto, de modo a estabelecer as diferenças entre os concretos comuns e o CAD. Essa interpretação sob novos pontos de vista, levando-se em conta principalmente o aprimoramento das técnicas de produção de cimento, os materiais alternativos, o emprego de aditivos que permitem grande mobilidade para projetar concretos de acordo com as adversidades a serem enfrentadas – quer seja pela agressividade do ambiente, ou pela proposta arquitetônica, ou pela dificuldade de execução (acesso, lançamento, tempo, etc.) – formará o real conceito do CAD e esclarecerá suas propriedades essenciais.

Aïtcin e Neville (2003) resumem a história da evolução das leis, que ora regem a relação entre resistência à compressão e relação  $a/agl$ , citando Féret como sendo provavelmente o primeiro a formular a relação entre a resistência à compressão do concreto com seus materiais constituintes, trabalho desenvolvido na França em 1892.

Féret entendia que a presença de água e ar preenchendo os vazios na argamassa eram aspectos negativos para a resistência à compressão dos concretos, deduzindo a relação potencial (1):

$$f_c' = kC^2 / (C + W + A)^2 \quad (1)$$

Onde C, W e A representam o volume de cimento, água e ar incorporado respectivamente, num volume unitário de concreto; k é um coeficiente que depende das propriedades do cimento; e,  $f_c'$  é a resistência à compressão da argamassa em ensaios com forma, tamanho e idades específicos. Féret concluiu ser a segunda potência a melhor linha de tendência para os valores determinados em seus estudos em função do coeficiente k.

Introduzindo o termo W/C, ainda em termos volumétricos, a equação (1) pode ser reescrita como:

$$f_c' = k / [1 + W/C + A/C]^2 \quad (2)$$

Para concretos comuns, com a finalidade ilustrativa, podem ser consideradas as seguintes proporções volumétricas em  $1 \text{ m}^3$ : C = 0,1, A = 0,01 a 0,02, e W = 0,2. Assim W/C = 2 e A/C = 0,1. Desse modo, o último valor pode ser desprezado, passando a equação (2) para a seguinte forma:

$$f_c' = k / [1 + W/C]^2 \quad (3)$$

Outra relação entre a resistência à compressão do concreto e relação água cimento mostrada por Aïtcin e Neville (2003) trata-se da equação proposta por Abrams, em 1925 nos Estados Unidos da América:

$$f_c' = A / B^{w/c} \quad (4)$$

Onde  $W/C$  é a relação água – cimento expressa em volume, e  $A$  e  $B$  são constantes dependentes de condições específicas, tais como o tipo de cimento, período de cura e idade de ensaio.

Aïtcin e Neville (2003) relatam que os trabalhos de Féret e Abrams representam uma significativa contribuição para o entendimento e, acima de tudo, o uso do concreto. Entretanto, o cimento usado por eles era muito diferente dos atuais, pois tinha pequena reatividade inicial, e os concretos recentes têm outras adições e aditivos. Féret e Abrams não dispunham de aditivos plastificantes. A trabalhabilidade daqueles concretos era governada somente pela relação água-cimento. Os valores da relação  $a/c$  utilizados por Féret e Abrams eram por volta de 0,65 e 1,00 em massa. A diferença dos espaços entre as partículas de cimento dos concretos por eles utilizados e um CAD com  $a/c$  de 0,25 está ilustrado pela Figura 9.

Na pasta com relação  $a/c$  0,25, há mais grãos de cimento e conseqüentemente menos água por unidade de volume tanto que os grãos de cimento estão muito mais próximos uns dos outros do que na pasta de cimento com relação  $a/c$  de 0,65.

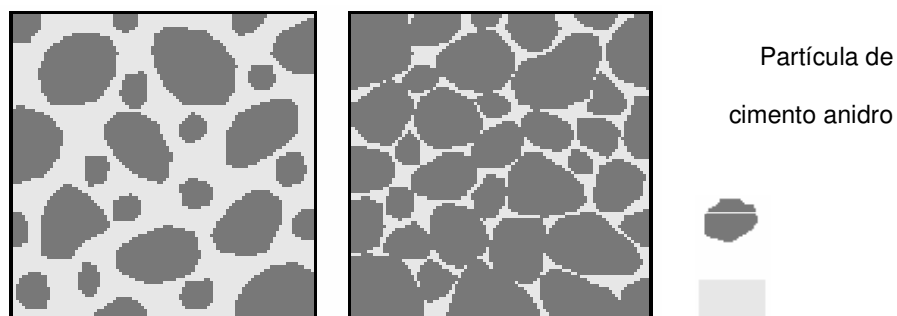


Figura 9. Representação diagramática da pasta de cimento em estado fresco com relação  $a/c$  de 0,65 e de 0,25. A razão das áreas de água e cimento em massa é igual à razão em volume. Fonte: (AÏTCIN; NEVILLE, 2003).

A utilização de pastas de cimento com baixa relação a/c é possível a partir do uso dos aditivos tensoativos, os quais proporcionam trabalhabilidade às misturas, dispensando a adição de grandes quantidades de água para homogeneizá-las.

Aïtcin (2003) explica que esta diferença resulta em dois processos de hidratação completamente diferentes. A pasta com relação a/c igual a 0,65 é muito porosa, e rica em produtos de hidratação externos, obtidos pelo processo de dissolução-precipitação, enquanto a pasta com relação a/c 0,25 é muito compacta e essencialmente composta pelos produtos de hidratação interna formado pelo processo topoquímico.

Essas diferenças nos processos de formação dos produtos de hidratação resultam em diferentes microestruturas de comportamentos distintos no que diz respeito à durabilidade, resistência mecânica e zona de transição pasta – agregado. As figuras 10 e 11 ilustram tais questões.

Aïtcin (2003) aponta as mudanças volumétricas e conseqüentemente as exigências de cura do CAD como um importante e um dos principais diferenciais em relação aos concretos comuns. As alterações volumétricas por ele citadas são as retrações plásticas, retração isotérmica ou autógena e retração por secagem.

A origem destas variações volumétricas tem a mesma causa para os três tipos: o surgimento de tensões de tração quer seja pela exsudação (retração plástica), quer pela auto-dessecação (retração autógena), quer pela secagem (retração por secagem).

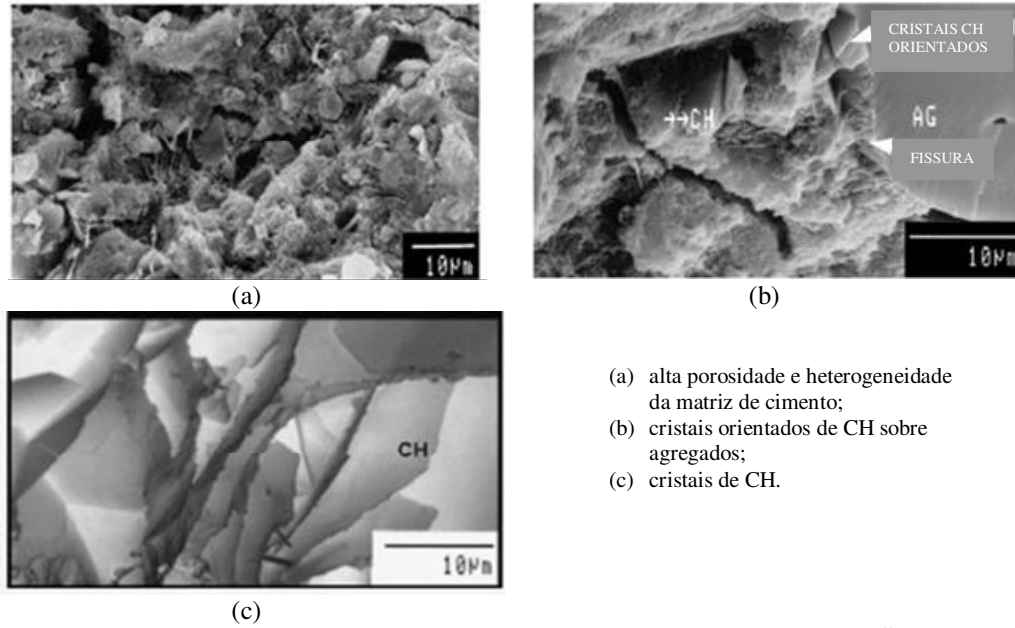
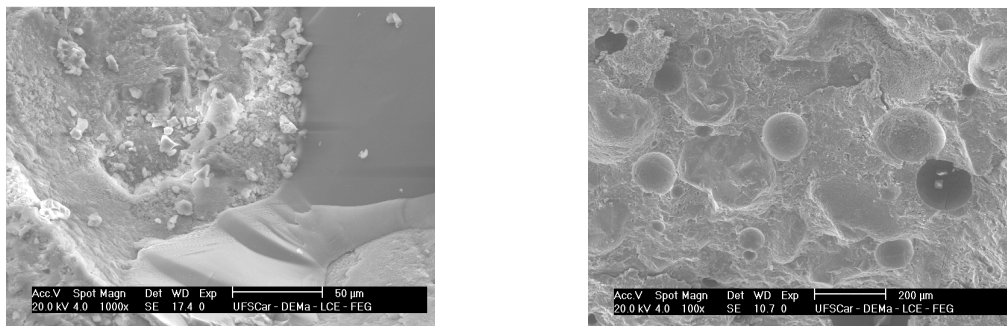


Figura 10. Microestrutura de uma pasta com alta relação  $w/c$ . Fonte: AÏTCIN (2003).



a) Ausência de zona de transição entre pasta de cimento e agregado.

b) Pasta de cimento densa e bolhas de ar incorporado no concreto de alto desempenho.

Figura 11. Microestrutura de um CAD.

A retração autógena é uma consequência da contração química ocorrida na pasta do cimento quando a água hidrata as partículas de cimento. De fato, o volume absoluto dos produtos de hidratação formado é maior do que a soma do volume absoluto das partículas de cimento e da água reagentes. A hidratação cria aproximadamente 8% de vazios, como demonstrado por Powers e Brownyard (2003).

Essa rede de poros muito finos drena a água de capilares maiores em que ela não esteja fortemente ligada. Conseqüentemente, no decorrer da hidratação é observado o

esvaziamento dos capilares maiores (como no caso da retração por secagem), mas sem perda de massa. Esse fenômeno é chamado de auto-dessecação, causado pelo movimento da água que migra dos capilares maiores em direção aos poros mais finos presentes nos produtos de hidratação do cimento (AÏTCIN, 2003).

A retração por secagem ocorre quando o concreto seca ao ar, perdendo água interna em seguida à exsudação, causando, assim, o aparecimento de meniscos dentro dos capilares maiores. No caso da retração por secagem, há perda de massa.

Em concretos com  $a/c$  maior do que 0,50, por exemplo, existe água além da necessária para a hidratação completa do cimento e a maior parte dessa água está contida em grandes capilares bem conectados. Os meniscos criados pela auto-dessecação, nesses grandes capilares, geram tensões de tração de valores muito pequenos. Portanto, a pasta de cimento hidratada praticamente não retrai.

No caso do CAD com relação  $a/c$  de 0,35 ou menor, uma quantidade significativa maior de cimento e menor de água é utilizado. Nesse caso a rede de capilares inicial é composta por capilares muito finos. Quando a auto-dessecação se inicia, concomitantemente com a hidratação, os meniscos são rapidamente formados dentro desses pequenos capilares, caso nenhuma água externa seja disponibilizada para reposição. Uma vez que muitos grãos de cimento começam a se hidratar simultaneamente no CAD, a secagem de muitos capilares pode gerar uma alta tensão de tração, causando, assim, a fissuração da pasta de cimento hidratada. Essa fissuração precoce é chamada de autógena (AÏTCIN, 2003).

Quando as partículas de cimento são hidratadas com a disponibilização de água externa, há um aumento no volume absoluto do cimento, o que conduz ao preenchimento de alguns finos capilares. Nesse caso seria mais apropriado discutir em

termos de retração isotérmica, preferencialmente a retração autógena, visto ser esse termo referente a um sistema fechado, interno ao material.

Desse modo, Aïtcin (2003) estabelece a diferença essencial entre o concreto comum e o CAD. O primeiro praticamente não apresenta a retração autógena, com ou sem disponibilidade de água, enquanto o segundo pode sofrer consideravelmente as conseqüências da retração autógena, caso não seja curado adequadamente.

Segundo Neville (1997), a variação de volume no concreto em virtude da retração por secagem não é equivalente ao volume de água retirado. A retração por secagem é causada pela perda de dois tipos de água: (1) a água livre e (2) a água adsorvida pelos produtos de hidratação. A perda da água livre provoca uma retração insignificante.

A água adsorvida da pasta de cimento hidratada não restringida, ou seja, possível de ser retirada, é equivalente a uma camada de água com espessura de uma molécula de água na superfície de todas as partículas de gel. Powers (1959) *apud* Neville (1997) relata que a espessura de uma molécula de água é aproximadamente igual a 1% do tamanho de uma partícula de cimento, fato que relaciona a área específica dos aglomerantes com a retração por secagem.

Quanto maior a relação  $a/agl$ , maior a retração por secagem, uma vez que será maior a facilidade e a velocidade à qual a água pode se deslocar para a superfície do concreto.

A retração por secagem da pasta de cimento hidratada inicia na superfície do concreto e progressivamente avança para o seu interior, dependendo da umidade relativa do ambiente e do tamanho dos capilares. A retração por secagem do concreto comum é rápida por conta da rede de capilares bem conectadas e contém capilares abertos na

superfície do concreto. A retração por secagem no CAD é lenta, porque os capilares são de diâmetros pequenos e rapidamente serão desconectados.

Outra diferença entre a retração por secagem e a retração autógena consiste no fato de que a primeira ocorre da superfície para o interior do concreto, enquanto a segunda é homogênea e isotrópica, à medida que as partículas de cimento e água estiverem bem distribuídas no concreto.

Assim, há diferenças consideráveis entre o concreto comum e o CAD, com respeito às variações volumétricas. A pasta de cimento do concreto comum apresenta rápida retração por secagem a partir da superfície em direção ao interior do concreto, enquanto o CAD pode ter a sua pasta de cimento afetada pela retração autógena, que ocorre de modo isotrópico e homogêneo, quando não curado adequadamente. A figura 12 mostra a influência do procedimento de cura para a estabilidade volumétrica do CAD.

Desse modo, Aïtcin (2003) mostra a importância da retração da pasta de cimento hidratada na estabilidade volumétrica do concreto; entretanto, esse autor cita que o parâmetro-chave para restringi-la é a quantidade de agregado no concreto e mais especificamente a quantidade de agregado graúdo.

Esse parâmetro é freqüentemente negligenciado e admitido somente como um filler no concreto. A efetividade dos agregados na restrição da retração da pasta de cimento é facilmente comprovada pelo fato de que uma pasta de cimento sofre fissuração muito mais intensa que um concreto com a mesma relação a/c. Entretanto, deve-se enfatizar que a retração na pasta continua a mesma, somente a estabilidade volumétrica do concreto é melhorada.



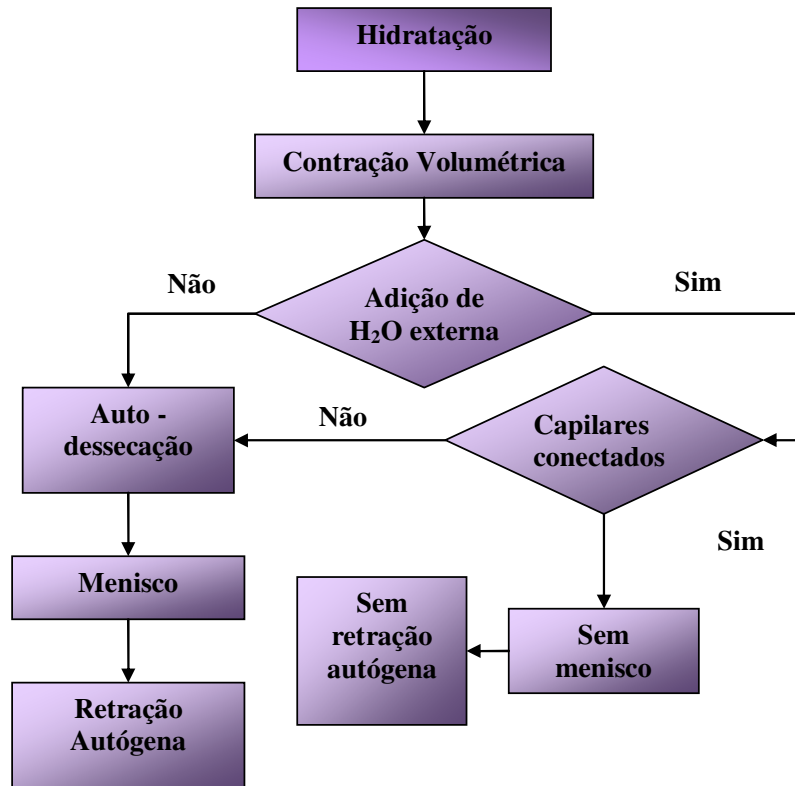


Figura 12. Influência das condições de cura na ocorrência da retração autógena. Fonte Aïtcin (2003).

Essas diferenças de comportamento da pasta de cimento têm conseqüências importantes para a cura e durabilidade do concreto.

Em decorrência dos fatos acima expostos, o processo de cura vem a ser outro grande diferencial entre o concreto comum e o CAD, sendo esses dois tipos de concreto curados de maneira diferentes, como ilustrado pela figura 13.

O CAD deve ser curado imediatamente após o término do seu lançamento, caso contrário, irá favorecer a evaporação da água de exsudação, e posteriormente, a retração autógena ocorrerá intensamente. Enquanto a manta de cura é suficiente para cura do concreto comum (que é insensível à retração autógena), ela pode prevenir a retração plástica no CAD, mas não tem nenhum valor na inibição de retração autógena (AÏTCIN, 2003).

Esse mesmo autor aponta o período crítico de cura para os concretos típicos de alto desempenho entre o término do lançamento até o 2º ou 3º dias posteriores ao lançamento, sendo das 12 às 36 horas posteriores ao término do lançamento é considerado o intervalo mais crítico.

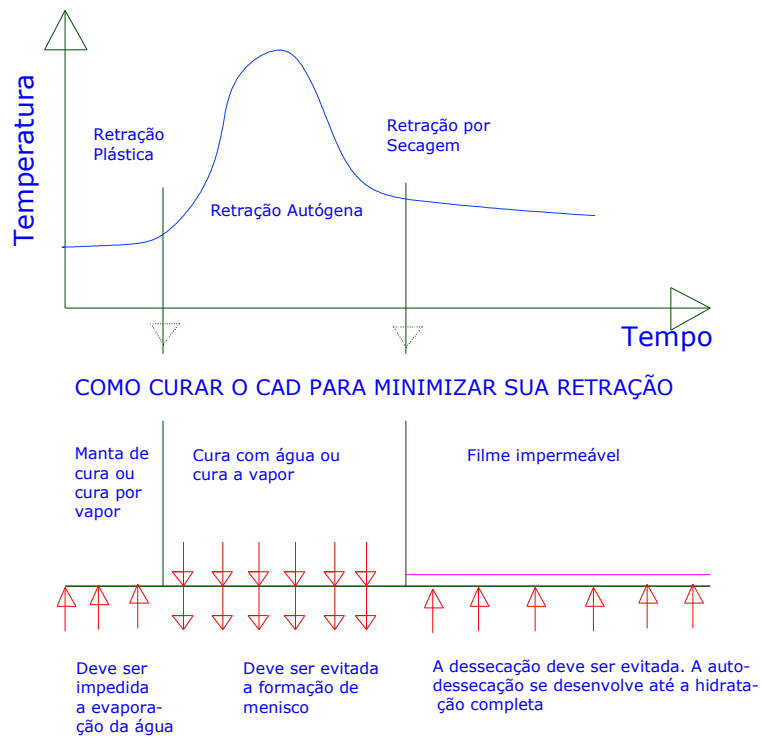


Figura 13. Regime de cura mais apropriado no decorrer da reação de hidratação do CAD. Fonte: (AITCIN, 2003).

Tais considerações mostram a necessidade de estudos mais aprofundados para estabelecer novas leis que determinem parâmetros relativos ao comportamento mecânico, bem como procedimentos de execução que considerem as características peculiares do CAD, além dos materiais atualmente utilizados na sua execução.

Melo (2000) baseia-se no princípio de que as propriedades de um dado material têm origem na sua estrutura interna e entende que o tipo, a quantidade, o tamanho, a forma e a distribuição das fases presentes constituem a sua estrutura.

A estrutura do CAD para ambientes com baixas temperaturas é heterogênea e altamente complexa. Propõe-se o seguinte esquema (figura 14) para a distribuição das fases constituintes do mesmo.

A fase agregado é predominantemente responsável pela massa unitária, pelo módulo de elasticidade (E) e pela estabilidade volumétrica do concreto. Essas propriedades do concreto dependem, em grande parte, da massa específica e resistência do agregado. A porosidade, a forma e a textura do agregado também afetam as propriedades do concreto. Essa região é, geralmente, mais resistente do que as outras, logo, não tem influência direta na resistência do concreto, exceto no caso de alguns agregados altamente porosos, fracos, deletérios e com forma inadequada.

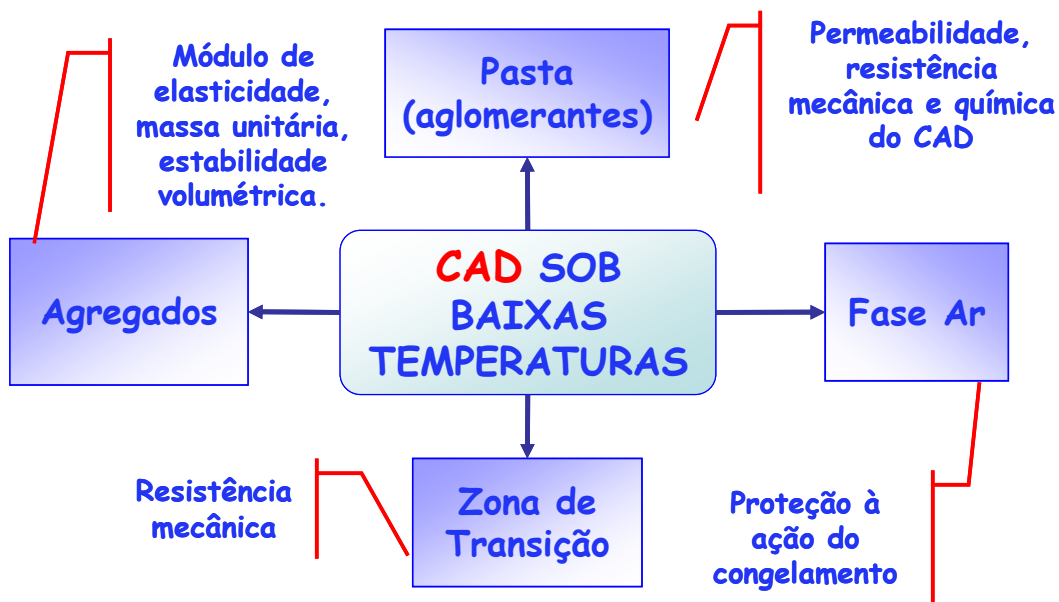


Figura 14. Esquema para distribuição das fases de um CAD para ambientes com baixas temperaturas. Fonte: Lima (2006).

O tamanho e a forma do agregado graúdo podem afetar a resistência do concreto de modo indireto. Por exemplo, quanto maior o tamanho do agregado no concreto e mais elevada a proporção de partículas lamelares e alongadas, maior será a tendência do filme de água se acumular próximo à superfície inferior do agregado, enfraquecendo,

assim a zona de transição (interface pasta-agregado). Esse é o fenômeno conhecido como exsudação interna. O agregado também poderá se romper por flexão muito aquém da resistência da rocha, por defeitos de britagem (deficiência de equipamento).

A pasta de cimento Portland endurecida exerce forte influência nas propriedades referentes à permeabilidade, resistência mecânica e química do concreto.

A fase ar é de suma importância para este trabalho, sendo a durabilidade frente a ambientes com baixas temperaturas atribuída a ela. As propriedades do sistema de ar, tais como o teor de ar incorporado e/ou aprisionado, a distribuição das bolhas e a área específica das bolhas são responsáveis pela resistência do concreto ao congelamento. O sistema de poros forma, segundo Mehta e Monteiro (1994), a fronteira de escape, pela qual a pressão, produzida tanto pelo movimento da água quanto pela formação e crescimento dos cristais de gelo, é aliviada.

### **2.1.3 Desvantagens do concreto de alto desempenho**

Nas seções anteriores foram apresentadas várias definições e propriedades do concreto de alto desempenho, as quais corroboram por eleger a durabilidade como sendo a principal característica desse material.

A durabilidade está relacionada, dentre outros fatores, à baixa permeabilidade do CAD, obtida com o refinamento dos poros de uma densa matriz de cimento.

Embora sejam muitas as vantagens em se utilizar o CAD, há que se conhecerem algumas de suas limitações para que o desempenho esperado seja de fato, possível nas obras.

A alta resistência da matriz da pasta de cimento do CAD confere-lhe o comportamento da ruptura frágil, ou seja, o CAD não apresenta deformações excessivas

antes de se romper. Pereira Neto<sup>6</sup> (1994) *apud* Barbosa et al. (2006) relaciona as alterações de microestrutura do CAD à forma de ruptura em relação ao concreto convencional, relatando que o CAD ao ser submetido à tensão superior a sua resistência máxima, apresenta característica de ruptura frágil.

A durabilidade do CAD frente a algumas patologias também pode ser prejudicada quando o mesmo trabalha sob tensão. V.M. Silva (2007) demonstrou o desempenho superior do CAD em relação aos concretos convencionais frente à ação da carbonatação e conseqüente corrosão das armaduras em elementos estruturais. Entretanto, sob tensão, as fissuras decorrentes do carregamento, tornam-se caminhos preferenciais para o dióxido de carbono até a zona de armadura. Com isto, a aplicação de CAD em atmosferas agressivas, com o intuito de se evitar a corrosão decorrente do processo de carbonatação, deverá estar condicionada ao controle do nível de tensão, de tal modo que este não seja suficiente para abrir fissuras nas faces expostas dos elementos. V.M.Silva (2007) sugere o controle preventivo das fissuras com a aplicação de impermeabilizantes superficiais.

SILVA, F.G. (2006) num estudo sobre corrosão de armaduras em CAD frente a ação de cloretos comprovou a maior ascensão capilar para o CAD, muito embora, este fato não tenha prejudicado a durabilidade do mesmo para o caso em estudo. Este fenômeno físico pode incorrer em alguns problemas específicos, como foi demonstrado por esta autora a cerca da ação de baixas temperaturas em elementos de concretos submetidos a ciclos de gelo e degelo.

## **2.2 A ação das baixas temperaturas sobre o concreto**

---

<sup>6</sup> PEREIRA NETO, P. M. O efeito do agregado graúdo em algumas propriedades do concreto de alta resistência com microssílica. São Paulo, 1994. 173 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

A problemática do concreto, quando submetido às baixas temperaturas, consiste no fato de que é um material poroso, capaz de armazenar água, a qual sob a ação do congelamento, aumenta de volume e se movimenta pelos capilares do concreto, causando pressão em suas paredes.

Powers (1945) e Powers e Helmuth (1953) desenvolveram uma série de experimentos que possibilitaram o entendimento da ação do congelamento sobre concretos, e designaram dois fenômenos como sendo os causadores da deterioração deste material, quando submetidos às baixas temperaturas: (1) a geração da pressão hidráulica; e (2) a difusão da água-gel e água capilar.

Quando a água contida nos capilares do concreto passa para o estado sólido, causa pressão hidráulica por conta do aumento do volume da água e provoca a movimentação da quantidade excedente para as capilaridades ou cavidades mais próximas da primeira. Esse movimento migratório causa pressão nas paredes dos capilares, os quais se deformarão, caso essa pressão supere a resistência do material, ou mesmo o capilar, inicialmente preenchido com gelo, rompa, caso o fluxo migratório não seja suficiente para aliviar a pressão. O fenômeno descrito corresponde à geração da pressão hidráulica.

Os vazios capilares no concreto são de diferentes tamanhos (figura 15). Quanto maior a dimensão desses vazios, maior a temperatura de congelamento da água nele contida. A coexistência da água em diferentes estados físicos, além do congelamento em diferentes temperaturas no concreto – o que implica em diferentes níveis de energia – causa a depleção da água dos capilares menores para os maiores, pois quanto menor o capilar e maior o grau de saturação do mesmo, maior será o nível de energia da água nele armazenada.

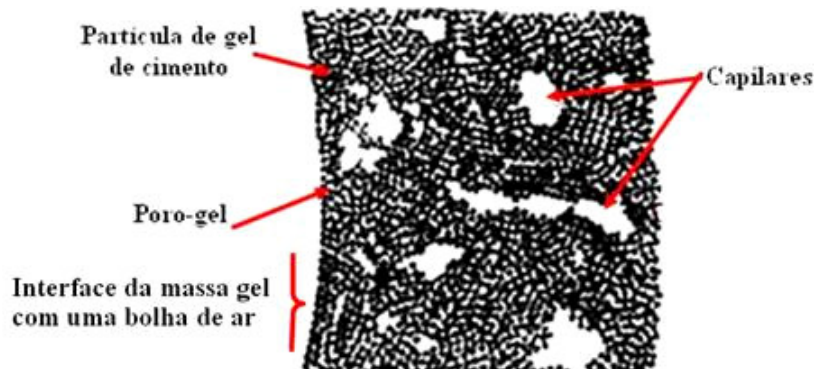


Figura 15. Estrutura da pasta de cimento. Fonte: Powers e Helmuth (1953).

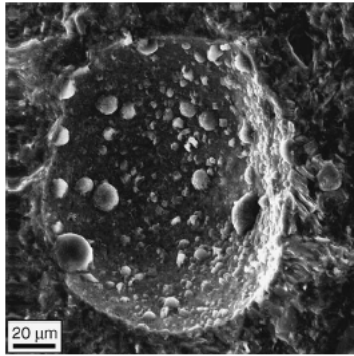
Esse fenômeno é denominado de difusão capilar e se inicia na massa-gel, uma vez que possui os menores vazios no concreto. A difusão da água-gel causa contração inicialmente, e, numa segunda etapa, essa depleção para os capilares ou cavidades, provoca o aumento dos cristais de gelo nelas contidos, incorrendo na deformação dessas cavidades caso não existam vazios próximos o suficiente para acomodar o excesso de água.

Os vazios de ar presentes nas pastas limitam a pressão hidráulica e o crescimento dos cristais de gelo pela difusão da água-gel ou água capilar, em função da distância entre esses vazios ( $L_{\text{crítico}}$ ). Powers (1949) sugere a incorporação de  $6 \pm 1\%$  de ar incorporado no concreto para protegê-lo da ação do congelamento. Entretanto, tais vazios deverão estar próximos um dos outros, de maneira que o diâmetro dos mesmos seja, em média, a distância entre suas paredes. Powers (1945) também demonstrou que, se limitada a relação água/aglomerante em 0,25, pastas de cimento completamente hidratadas não sofrerão danos por baixas temperaturas, em virtude da eliminação da água congelável armazenada nos poros dessas pastas.

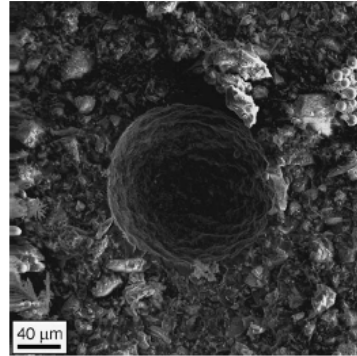
Os vazios de ar presentes na matriz da pasta de cimento do concreto são preenchidos por cristais de gelo provenientes de diferentes capilares. Sendo assim, os vazios são preenchidos gradualmente por vários e discretos cristais de gelo. Estudos sobre a formação do gelo nos vazios do concreto, elaborados por Corr *et al.* (2004),

permitiram um avanço no entendimento da ação do congelamento sobre o concreto, mormente no que diz respeito à morfologia e à formação dos cristais de gelo.

Um vazio de ar preenchido com pequenos cristais de gelo é mostrado na figura 16 a., e o mesmo vazio após a sublimação do gelo é apresentado na figura 16 b.



a) Vazio de ar com cristais de gelo.



b) Vazio de ar após a sublimação do gelo.

Figura 16. Micrografias eletrônicas de varredura obtidas em temperatura criogênica: a) vazio de ar preenchido parcialmente por cristais de gelo; b) vazio de ar após a sublimação dos cristais de gelo. Fonte: Corr et.al. (2004).

Corr et al. (2004) utilizaram um microscópio eletrônico de varredura a baixas temperaturas (LTSEM), o qual produz as imagens microscópicas das amostras mantendo-as em temperatura criogênica de  $-190^{\circ}\text{C}$ . Esta técnica dispensa a dessecação da amostra.

### 2.3 Ação dos ciclos de gelo e degelo sobre o concreto

Considerando a superfície de um corpo-de-prova em contato com água por algum tempo anterior ao início do ciclo de gelo, observa-se que a camada superficial do corpo-de-prova estará saturada ou próxima da saturação e, o conteúdo de água será maior nessa região do que nas camadas mais internas. Uma vez que o resfriamento do concreto ocorre junto à presença da água, o processo de congelamento terá uma seqüência de eventos tal como: primeiramente haverá a formação de gelo próximo à



superfície; em seguida, a água solidificará nos capilares próximos à superfície, expandindo; e o excesso de água, ainda em estado líquido, migrará para regiões mais internas e, assim, sucessivamente. A figura 17 ilustra o mecanismo descrito, que representa a seção transversal de um corpo-de-prova.

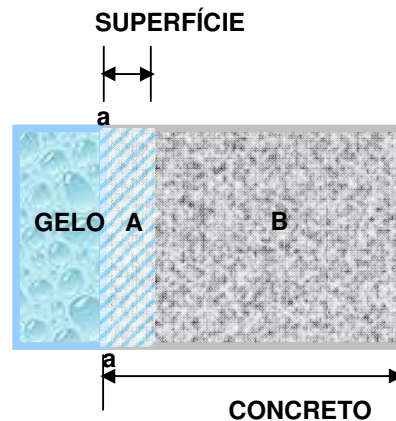


Figura 17. Seção transversal esquemática de um corpo-de-prova de concreto submetido ao resfriamento. Fonte: Lima (2006).

O plano (**a-a**) corresponde à superfície do concreto. A região “A” é a mais próxima do gelo e está saturada. “B” é a região mais distante da superfície do corpo-de-prova com menor conteúdo de água.

O gelo se formará, primeiramente, sobre a superfície do corpo-de-prova (plano a-a) a 0°C, onde está sob a pressão atmosférica. A região saturada (A) terá parte de sua água congelada a 0°C e parte a temperaturas inferiores, em virtude da pressão superior a uma atmosfera. O excesso de água supergelada migrará para a região mais interna e menos saturada.

Em ciclos repetidos de gelo e degelo em água, a espessura da região “A” (figura 17) aumenta de acordo com a quantidade de água absorvida pelo corpo-de-prova de concreto. Enquanto a espessura da região A aumenta, a resistência à percolação da água para as regiões mais internas, menos saturadas, também aumenta e, quando a região torna-se suficientemente espessa e a pressão hidráulica atingir valor superior ao da

resistência do material, partes da região “A” sofrerão deterioração por desagregação. A espessura da região “A”, no instante em que ocorre a desagregação, é denominada de profundidade crítica de saturação.

Uma das implicações desta teoria é que, se um corpo-de-prova com estrutura uniforme não estiver totalmente saturado – mesmo que submetido à imersão em água antes do início dos ciclos – nenhuma desagregação ou esfarelamento ocorrerá por causa do gelo e degelo até que tenha sido absorvida água suficiente para a saturação da profundidade crítica da sua superfície.

A profundidade crítica de saturação dependerá das propriedades do concreto em relação à grandeza da pressão hidráulica gerada e da resistência do material, em função da permeabilidade do material, da quantidade de água congelável e da diferença da quantidade de água na região “A” e do grau de saturação dessa região.

#### **2.4. A importância do sistema de vazios para o desempenho do concreto em baixas temperaturas**

A teoria desenvolvida por Powers (1945, 1949, 1954, 1955, 1965, 1975) e Powers e Helmuth (1953) são as mais aceitas para a explicação dos danos causados ao concreto pela ação do congelamento (ENÜSTÜN; SOO; BERGENSON, 1994).

Segundo esta teoria, a presença de um sistema de poros bem distribuído e com um volume adequado à acomodação do crescimento dos cristais de gelo protege o concreto da ação do congelamento.

Lelusz e Malaszkiewicz (2004) descreveram a alteração no sistema de poros de corpos-de-prova de concreto submetidos a ciclos de gelo e degelo. Os autores constataram que, no decorrer dos primeiros ciclos de gelo e degelo, as fissuras permitem

o acesso da água expulsa de capilares a grãos anidros de cimento depositados nas paredes dos vazios de ar incorporado. Com isso, ocorre a redução da porosidade da matriz de cimento do concreto, devido à hidratação desses grãos anidros, que formam inicialmente etringita e hidróxido de cálcio. Há um aumento da resistência à compressão nos primeiros 25 ciclos, mas a propagação das fissuras devido à pressão hidráulica leva o concreto à ruptura. Lelusz e Malaszewicz (2004) observaram corpos-de-prova de concreto dosados com a/c de 0,60, e relação 1:m, m = 6,1 e o cimento de composição química de 58,09% de C<sub>3</sub>S, 21,02% de C<sub>2</sub>S, 12,16% de C<sub>3</sub>S, 6,20% de C<sub>4</sub>A e 2,53% de outros compostos químicos.

Diamond (2004) relata a presença de hidróxido de cálcio nas paredes dos vazios de ar do concreto e, quando ele é submetido a ciclos de molhagem e secagem, a quantidade desse produto de hidratação aumenta, e também haverá a formação de etringita nos poros. Tais depósitos são esparsos na maioria das vezes, mas, em alguns casos, como em ciclos de gelo e degelo, podem preencher todo o vazio.

Em se tratando de durabilidade de concreto frente a ação de baixas temperaturas, um dos parâmetros mais estudados é o espaçamento entre os vazios (PIGEON; GAGNÉ; FOY, 1987), (FOY, PIGEON, BANTHIA, 1987), (LI, LANGAN, WARD, 1991), (BOUZOUBAË, *et al.*; 2002), (CORR, *et al.*; 2004) . O máximo espaçamento entre os vazios de ar a não causar prejuízos devido ao movimento da água em situações de baixas temperaturas, é chamado de espaçamento crítico.

Attigbe (1993) formulou uma equação (5) de fácil aplicação e de razoável precisão para o cálculo do fator de espaçamento entre os vazios de ar, utilizando-se de conceitos de probabilidade geométrica e do modelo da estrutura do concreto (i.e. fases do concreto: agregados, matriz da pasta de cimento, zona de transição, vazios).

$$\bar{s} = 2 \frac{p^2}{\alpha A} \quad (5)$$

Onde:

S = fator de espaçamento;

P = taxa de pasta no concreto

$\alpha$  = área específica de vazios de ar

A = teor de ar no concreto.

Fator de espaçamento é o valor correspondente à metade da distância entre duas paredes de vazios de ar. Esse fator corresponde ao máximo percurso que o excedente de água, proveniente da matriz de cimento do concreto, deverá percorrer para alcançar um vazio de ar, durante a ação do congelamento no concreto.

A equação proposta por Attiogbe (1993) é uma alternativa para o cálculo do espaçamento entre os vazios de ar, em relação à ASTM C 457<sup>7</sup>, a qual se baseia no método proposto por Powers (1949), conforme as equações (6) e (7) descritas a seguir:

$$\bar{s} = \frac{P}{4n} \text{ para } P/A \leq 4,342 \quad (6)$$

e

$$\bar{s} = \frac{3}{\alpha} \left[ 1,4 \left( \frac{P}{A} \right)^{1/3} - 1 \right] \text{ para } P/A > 4,342 \quad (7)$$

Onde:

S = fator de espaçamento;

P = taxa de pasta no concreto

$\alpha$  = área específica de vazios de ar

A = teor de ar no concreto.

---

<sup>7</sup> AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Microscopic Determination of Air-Void Content and Parameters of Air-Void System in Hardened Concrete: C 457 - 89.** Philadelphia: ASTM, 1989. 19 p.

$n$  = média do número de vazios interceptados por uma diagonal na seção transversal de uma amostra (obtido por microscopia óptica)

Segundo Attiogbe (1983), as equações propostas por Powers (1949) resultam em valores de espaçamento maiores que os reais. Por esse motivo, as projeções de durabilidade do concreto baseadas nas equações (6) e (7) ficam subestimadas.

O modelo concebido por Attiogbe (1993) considera a distância média entre três vazios de ar ( $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$ ) e um elemento infinitesimal de arestas  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  e  $\Delta z$  cujo comprimento corresponde ao valor médio ( $\bar{d}$ ). Uma vez que  $\bar{d}$  é definido como a distância entre os vazios, os quais estão totalmente preenchidos por pasta, pode-se considerar que as arestas dos cubos correspondem à espessura da pasta que envolve os vazios de ar (Figura 18).

Os centróides dos vazios de ar podem estar localizados em qualquer ponto do elemento infinitesimal. Sendo o comprimento de cada aresta desse elemento igual à distância entre os centróides dos vazios de ar adjacentes no modelo adotado, em cada elemento estará contido um único centróide, portanto, um único vazio de ar inteiro, ou um único centróide e parte de dois vazios.

Isso é o bastante para considerar que o número de elementos infinitesimais seja igual ao número de vazios em todo o volume, cujo valor total a ser considerado será dividido em elementos cúbicos infinitesimais, que terão a mesma probabilidade de serem escolhidos aleatoriamente.

Seja  $\lambda_i$  a espessura da pasta na direção  $z$  dentro do elemento cúbico, onde  $i$  é o índice de um elemento cúbico particular. A espessura da pasta pode ser considerada em qualquer das três direções, pois o concreto é considerado isotrópico. Dentro de cada elemento infinitesimal, a espessura da pasta é considerada em relação ao centróide do

vazio de ar ou agregado. Na figura 18.d,  $\lambda_i$  corresponde à soma de  $S_a$  e  $S_b$ . A espessura total do corpo-de-prova de concreto na direção  $z$  corresponde à soma total das espessuras dos elementos infinitesimais ( $\bar{d}$ ) e será designada por  $T$ . A soma de  $\lambda_i$  de todos os elemento cúbicos é uma fração de  $T$ .

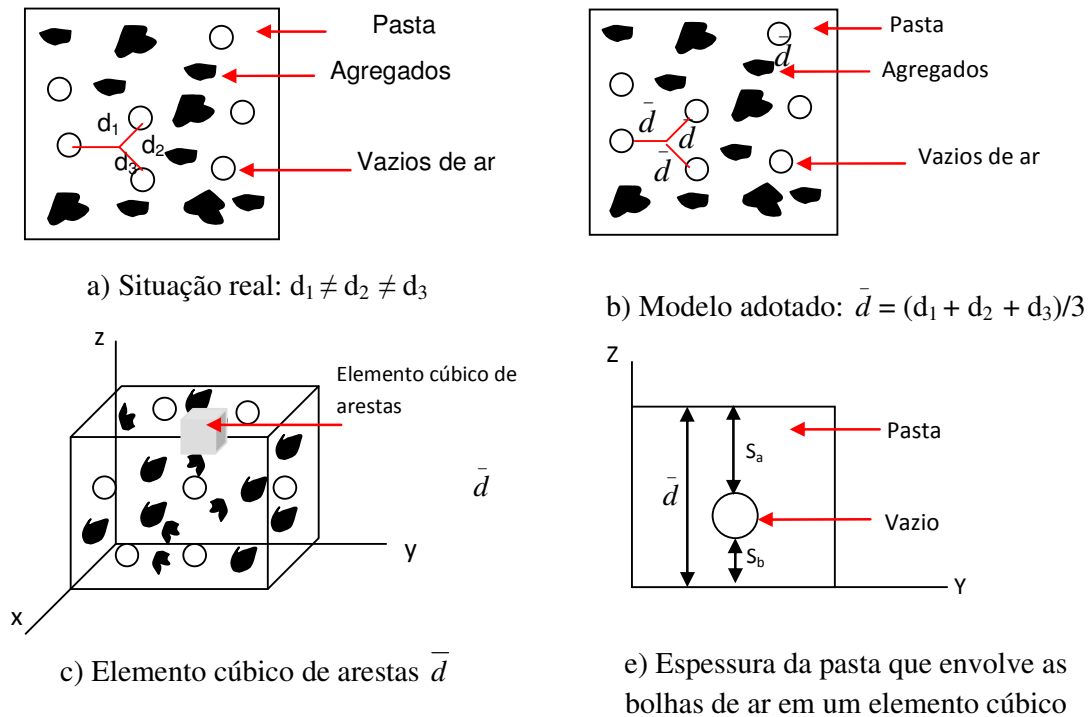


Figura 18. Distribuição dos vazios de ar no concreto. Fonte: Attiogbe (1993).

A espessura média da pasta que envolve os vazios de ar no elemento cúbico é igual a  $1/2 \lambda_i$ . Baseando-se em conceitos estatísticos, o valor médio da espessura da pasta esperado é igual à soma, em todo o volume, do produto da média da espessura da pasta, pela probabilidade,  $Pr(P,a)$ , de ocorrência de cubos, contendo pasta e um particular vazio de ar (Eq.8).

$$E_s = \bar{s} = \sum_{i=1}^{N_i} \left[ \frac{1}{2} \lambda_i Pr(P,a) \right] \quad (8)$$

Onde,  $E_s$  representa o valor  $1/2 \lambda_i$ , que é igual à média dos valores  $\bar{s}$ .  $N_T$  é o número total de elementos cúbicos no volume. Nos casos em que alguns vazios de ar são maiores que o volume do elemento cúbico, o valor de  $\lambda_i$  é nulo na somatória expressa pela equação 8. Sendo assim, a equação (8) é válida para sistemas de ar compostos de vazios de mesmo tamanho ou vazio de ar de diferentes tamanhos.

As hipóteses que validam esse modelo são:

- 1) O concreto é isotrópico;
- 2) Os vazios de ar e os agregados estão distribuídos na matriz da pasta, cuja distância entre os centróides dos vazios de ar adjacentes é igual ao valor médio para todo o sistema;
- 3) O concreto possui vazios de ar com diâmetros iguais ou diferentes.

A espessura da pasta que envolve o vazio de ar,  $\bar{s}$ , é a máxima distância que a água congelável deverá percorrer para alcançar um vazio de ar. O parâmetro  $\bar{s}$  é a metade da distância entre dois vazios de ar adjacentes (figura 19).

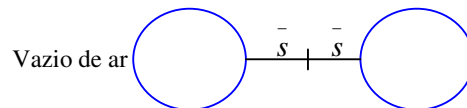


Figura 19. Espaçamento  $\bar{s}$  entre os vazios de ar. Fonte: Attiogbe (1993).

Sendo  $N_P$  o número total de elementos cúbicos que contém pasta, e  $F$  a razão entre o número de cubos que contém pasta e vazios de ar, e o número de elementos cúbicos que contém pasta ( $N_P$ ), então o número de cubos que contém vazios de ar e pasta será dado por  $FN_P$ .  $F$  será igual a 1, se o número de cubos contendo pasta também conter um vazio de ar, e  $F$  será menor que 1, se o número de cubos que

contém somente pasta for maior que o número de cubos que contém pasta e vazios de ar, portanto  $0 < F \leq 1$ .

A probabilidade de que um elemento cúbico selecionado aleatoriamente contenha pasta e vazios de ar será igual a  $FN_p/N_T$ . A probabilidade de que um elemento cúbico selecionado contenha um único vazio de ar é  $1/N$ , onde  $N$  é número de elementos que contém um vazio, o qual é igual ao número total de vazios em todo o volume. Assim a probabilidade de ocorrência de um cubo contendo vazio e pasta,  $Pr(P,a)$ , será dada pela equação (9).

$$Pr(P,a) = \frac{FN_p}{N_T} \frac{1}{N} \quad (9)$$

Sendo  $V_p$  o volume total de pasta no concreto e  $V_T$  o volume total do concreto, então:

$$\frac{N_p}{N_T} = \frac{V_p / \bar{d}^3}{V_T / \bar{d}^3} \quad (10)$$

Onde  $\bar{d}^3$  é o volume de cada elemento cúbico. A equação (10) pode ser escrita como segue:

$$\frac{N_p}{N_T} = \frac{V_p}{V_T} = p \quad (11)$$

Onde  $p$  é a porção de pasta no concreto. Substituindo a equação (11) na equação (9) vem:

$$P_r(P,a) = \frac{F_p}{N} \quad (12)$$

Substituindo a equação (12) na equação (8) vem:

$$\bar{s} = \frac{1}{2} F_p \frac{\left[ \sum_{i=1}^{N_T} \lambda_i \right]}{N} \quad (13)$$



Na equação 13, o termo somatório corresponde à espessura total de pasta envolvendo todos os elementos cúbicos no volume. Dividindo ambos, numerador e denominador da equação (13) por T, que corresponde ao comprimento total na direção z para todos os elementos cúbicos, a equação (13) será:

$$\bar{s} = \frac{1}{2} F_p \frac{\left[ \sum_{i=1}^{N_T} \lambda_i \right] / T}{N/T} \quad (14)$$

O numerador da equação (14) é a fração da espessura na direção z que está ocupada por pasta. A correlação entre esta fração linear e o volume do concreto foi obtida a partir dos fundamentos da estereologia<sup>8</sup>. Com a aplicação dessa técnica é possível demonstrar que a fração linear de pasta é igual à fração em volume de pasta p. A equação (14) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\bar{s} = \frac{1}{2} F \frac{p^2}{N/T} \quad (15)$$

A partir de princípio de estereologia, também é possível obter N/T por meio da análise de seções polidas de amostras de concreto, utilizando-se as instruções da ASTM C 457. Assim, N/T é média do número de vazios de ar interceptados por uma linha diagonal. Com as nomenclaturas designadas na ASTM C 457 vem:

$$N/T = n \quad (16)$$

E,

$$n = A / \bar{l} \quad (17)$$

Onde A é o conteúdo de ar no concreto e  $\bar{l}$  é a média do comprimento da corda que atravessa os vazios de ar pertencentes à diagonal.  $\bar{l}$  é expressa por:

---

<sup>8</sup> Estereologia é definida como uma técnica de interpretação espacial de seções planas (transversais) de diversos materiais, possibilitando análises quantitativas a partir de observações feitas em seções planas.

$$\bar{l} = 4/\alpha \quad (18)$$

Onde  $\alpha$  é a área específica dos vazios de ar. Assim a equação (15) pode ser escrita como:

$$\bar{s} = 2F \frac{p^2}{\alpha A} \quad (19)$$

Para que todo o volume de concreto esteja protegido da ação de gelo e degelo, será necessária a existência de vazios de ar em todo o volume de pasta; portanto o valor de  $F$  deverá ser igual a 1. Substituindo esse valor na equação (19), Attiogbe (1983) definiu a equação (20) a partir da qual é possível calcular o espaçamento crítico dos vazios de ar em concreto:

$$\bar{s} = 2 \frac{p^2}{\alpha A} \quad (20)$$

## 2.5 Concreto de alto desempenho para ambientes com baixas temperaturas

O desempenho dos concretos em baixas temperaturas foi analisado em Lima (2006), com a utilização de ensaios dinâmicos a partir do monitoramento da frequência natural, uma vez que tal parâmetro está relacionado à rigidez do material. A frequência natural é a taxa de oscilação livre de um material quando solicitado por uma força externa, ou seja, é o número de vezes que um corpo passa da posição na qual estava em repouso para a posição deformada após a aplicação de uma força externa.

Quanto maior o número de vezes que este corpo oscila num dado intervalo de tempo, maior será então sua frequência natural e, conseqüentemente, maior sua rigidez.

Ao sofrer a ação do congelamento, o concreto pode sofrer fissuração causada pelos processos de geração da pressão hidráulica ou difusão da água-gel e água-capilar.

A fissuração diminuirá a rigidez do material e, por conseguinte, o valor da frequência natural.

Para submeter corpos-de-prova de concreto à temperatura de  $-35^{\circ}\text{C}$ , construiu-se uma câmara de congelamento ilustrada na figura 20.

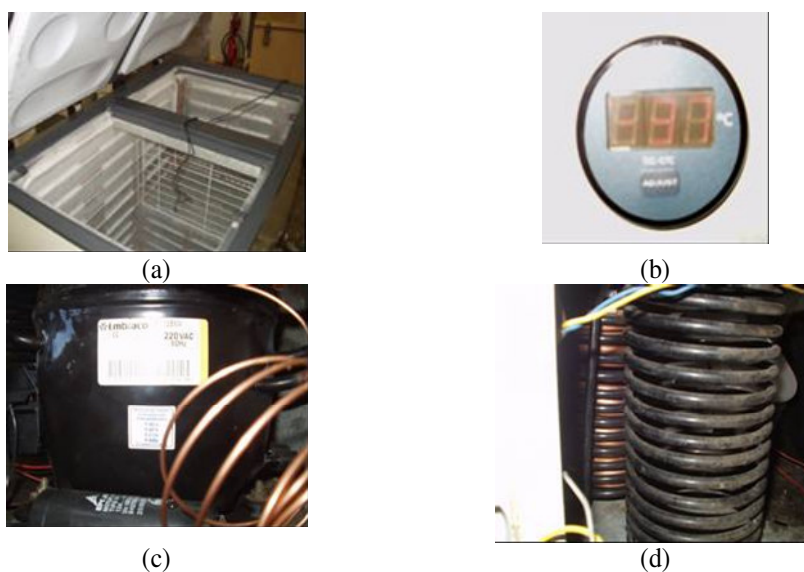


Figura 20. Unidade de congelamento: (a) caixa térmica e conjunto de serpentinas; (b) termostato; (c) compressor; (d) condensadores. Fonte: Lima (2006).

Avaliaram-se corpos-de-prova prismáticos de concreto (10 cm x 10 cm x 50 cm) com ar incorporado e sem ar incorporado e, analisaram-se os valores de frequência natural antes, durante e após a exposição ao congelamento.

### 2.5.1 Dosagem do CAD para ambientes com baixas temperaturas

O CAD proposto foi constituído pela fase aglomerante composta por cimento Portland CP II E 32 e sílica ativa proveniente da fabricação de ligas de ferro-silício ou silício metálico (SA), os agregados miúdo e graúdo foram da região de São Carlos/SP: respectivamente, areia de rio, e de rochas de natureza basáltica com dimensão máxima

de 19 mm. Os aditivos utilizados foram do tipo: superplastificante policarboxílico (Glenium 51) e incorporador de ar (IAR).

As relações 1:m, com m definido como o total de agregados, e a/agl foram obtidas pelo ábaco de dosagem (figura 21), cuja determinação resultou do processo proposto por Helene (1997) e adaptado por Liborio (2003).

Esse método consiste em dosar três misturas 1:m que fornecerão dados relativos ao consumo de cimento, relação a/agl, e a resistência mecânica. A partir dos três dados para cada propriedade é possível traçar as curvas de cada um desses parâmetros, as quais comporão o ábaco de dosagem.

Uma vez que os materiais são os mesmos para os três traços, o teor de argamassa é determinado para a primeira mistura dosada e todas as outras misturas são produzidas com a mesma consistência. De acordo com a aplicação do concreto, adotou-se a medida de abatimento determinada pelo tronco de cone (NBR NM 67: 1998)<sup>9</sup>, sendo nesta pesquisa de  $100 \pm 10$  mm.

Dois procedimentos podem ser adotados para este método de dosagem: (1) fixar a relação a/agl ou (2) a dosagem de aditivos (superplastificante e incorporador de ar). Adotou-se o mesmo teor de superplastificante e incorporador de ar para a realização das dosagens.

A escolha do teor de superplastificante foi feita a partir da análise do ensaio de Kantro, adotando-se, para a dosagem inicial o ponto de saturação. Entretanto, tal valor deve ser ajustado às propriedades almejadas para o concreto, tais como: consistência, durabilidade e permeabilidade. Em face destas questões, determinou-se o teor de 0,5% para as misturas sem agente incorporador de ar. Para as misturas com incorporador de ar, o teor de superplastificante foi ajustado para obter a consistência de  $100 \pm 10$  mm e o

---

<sup>9</sup> NBR NM 67:1998 – Consistência pelo abatimento do tronco de cone.

volume total de ar em  $6 \pm 1$  %, sendo determinados experimentalmente os teores de 0,25 % de superplastificante e 0,045 % para incorporador de ar. O teor de ar incorporado foi ajustado utilizando-se o método gravimétrico regulamentado pela NBR 9833: 1987<sup>10</sup>.

Além da análise de cada um dos materiais, diversas alternativas a respeito da seqüência de mistura dos materiais foram feitas, sendo que a mais adequada para o caso em estudo pode ser descrita conforme as etapas a seguir, baseadas nos estudos de Castro & Liborio (2003):

1. Mistura dos agregados graúdos com a sílica ativa e 10% da água de amassamento, misturando no tempo de 2 minutos;
2. Acréscimo do agregado miúdo, do cimento Portland CP II 32 E, 70% da água de amassamento, misturando por 5 minutos;
3. Adição do superplastificante e do incorporador de ar, para o concreto com ar incorporado, e 10% da água de amassamento, misturando por 2 minutos;
4. Acréscimo de 10% da água, misturando por 2 minutos.

Essa seqüência de mistura propiciou a dopagem dos agregados graúdos, além de permitir que transcorresse o tempo necessário para o início da reação de hidratação do cimento Portland para em seguida adicionar o superplastificante e o incorporador de ar, direcionando a ação dos aditivos à superfície dos aglomerantes já adsorvidos nas paredes dos agregados. Evitou-se, assim, que parte do volume destes tensoativos fosse desperdiçada ao ser envolvida por agregados ainda não revestidos por pasta de cimento.

Com os dados obtidos na dosagem, delineou-se o ábaco de dosagem da figura 21, a partir do qual se optou pelo traço definitivo do concreto sem ar incorporado e do concreto com ar incorporado.

---

<sup>10</sup> NBR 9833:1987 – Massa específica e teor de ar pelo método gravimétrico.

A massa específica do concreto sem ar incorporado foi  $\rho = 2,46 \text{ g/cm}^3$ ; para o concreto com ar incorporado, a massa específica foi de  $\rho = 2,32 \text{ g/cm}^3$ .

A consistência de ambos os concretos ensaiados a baixas temperaturas foi a mesma; entretanto, a trabalhabilidade do concreto com ar incorporado foi melhor, fato atribuído à presença de bolhas de ar que facilitam a mistura, o lançamento e o adensamento do concreto. Essas características do concreto com ar incorporado foram confirmadas no momento da moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos, e principalmente dos corpos-de-prova prismáticos.

Logo após a moldagem, a superfície exposta dos corpos-de-prova foi saturada por água e coberta por um filme plástico de modo a evitar as retrações: plástica, autógena e por secagem.

Tanto os concretos dosados com o intuito da construção do ábaco de dosagem, quanto os concretos a serem ensaiados a baixas temperaturas foram curados em câmara úmida após serem desmoldados. Os corpos-de-prova cilíndricos foram curados até as datas de 1, 7 e 28 dias, quando foram ensaiados para determinação da resistência a compressão, e os corpos-de-prova prismáticos foram curados até a idade de 28 dias.

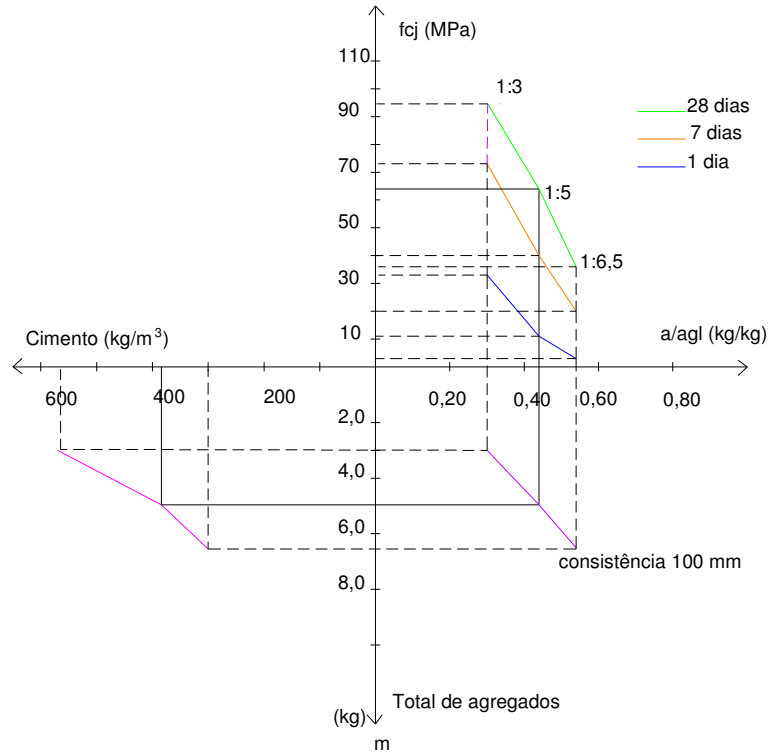


Figura 21. Ábaco de dosagem para determinação do traço do CAD para ambientes com baixas temperaturas. Fonte: Lima (2006).

O teor de argamassa<sup>11</sup> adequado para obtenção de uma mistura coesa, com bom acabamento superficial e de fácil manipulação para os materiais estudados, foi determinado em 56%.

Para a análise e definição das propriedades necessárias ao concreto para ambientes com baixas temperaturas, duas séries de corpos-de-prova foram moldadas, ambas compostas de concretos com mesmas relações a/agl e 1:m, distinguindo-se pelo uso ou não de agente incorporador de ar e teor de superplastificante. Conservou-se, para as séries, o teor de argamassa de 56 %, determinado por meio da dosagem, e a consistência foi estabelecido em  $k = 100$  mm, com o uso do ensaio do tronco de cone.

<sup>11</sup>Define-se teor de argamassa como sendo.  $\alpha = (1+a)/(1+a+p)$ , onde  $\alpha$  é o teor de argamassa, "a" é a parte em areia e "p" a parte em pedra em um traço unitário em massa.

Nove corpos-de-prova prismáticos, com seção transversal quadrada de 100 x 100 mm e comprimento de 500 mm, foram moldados para cada série.

O período de cura dos corpos-de-prova foi de 28 dias. As justificativas para escolha deste período são duas: uma técnica, e outra construtiva. A justificativa técnica baseia-se no objetivo de eliminar o máximo de água congelável no concreto, além de atingir maior resistência à tração para melhor suportar a ação da pressão hidráulica e da expansão causados pelo congelamento dos corpos-de-prova. A justificativa construtiva baseia-se na experiência na construção de sistemas para armazenamento de produtos congelados, cuja construção dos elementos de concreto precede à montagem dos equipamentos de frios, instalações elétricas, mecânicas e sistemas de isolamento, sendo que essas atividades exigem, normalmente, mais de 28 dias para serem executadas. A cura foi realizada em câmara úmida.

Com a definição dos parâmetros do projeto para o CAD<sup>12</sup> em ambientes com baixas temperaturas, tais como: consistência, dosagem de aditivos, composição do aglomerante, teor de argamassa, consumo de cimento, relação a/agl e a relação 1:m, foram definidos os traços de concretos a serem submetidos a baixas temperaturas, como mostra a tabela 2.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão para estes concretos são apresentados na tabela 3 e na figura 22.

Após esse período, os corpos-de-prova foram acondicionados numa câmara refrigeradora, de modo a submetê-los à temperatura alvo de - 35° C. Para controle da temperatura no centro térmico do corpo-de-prova, um exemplar de cada série continha um termopar alojado em seu interior, fixado durante a moldagem.

---

<sup>12</sup>Os resultados de ensaios de caracterização dos constituintes do CAD projetado por Lima (2006) estão apresentados na íntegra no anexo B.



Tabela 2 - Traços para estudo do CAD para ambientes com baixas temperaturas

Concretos submetidos à baixas temperaturas		
Parâmetros	Referência (sem aditivo incorporador de ar)	Concreto com aditivo incorporador de ar
1:M		1:5
1:a:p:a/agl		1:2,36:2,64:0,42
% S.P.	0,5	0,25
% IAR*	-	0,045
Teor de ar incorporado (%)	2	7
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	384	379
Teor de argamassa (%)		56
Consistência (mm)		100±10

\* Aditivo incorporador de ar – Norma Brasileira EB 1763

Tabela 3 – Resistência à compressão simples para os concretos que serão submetidos à temperatura de  $-35\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Resistência à compressão simples (MPa)			
Traço	$f_{ck1}$	$f_{ck28}$	$f_{ck63}$
1:5 (s/IAR)	10	53	61
1:5 (c/IAR)	8	38	43
Consistência 100±10mm			

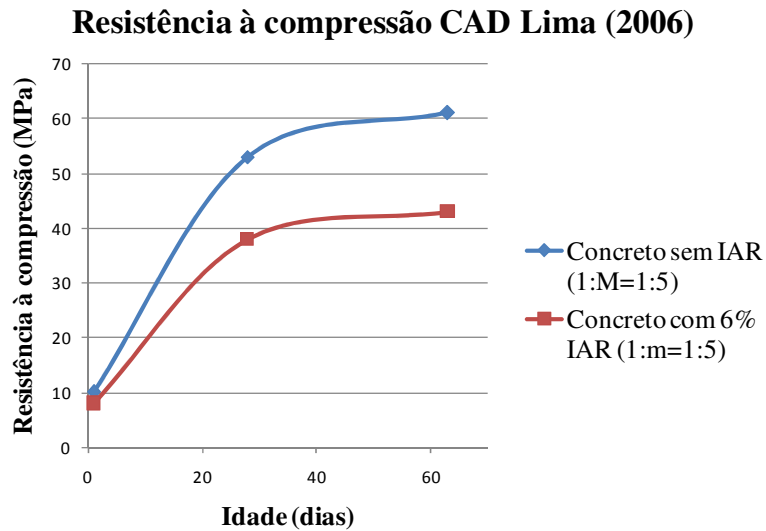


Figura 22. Evolução da resistência à compressão dos concretos com e sem ar incorporado desenvolvidos por Lima (2006).

### 2.5.2 Ensaios para análise do desempenho de concretos em baixas temperaturas

A determinação da frequência natural de vibração de corpos-de-prova de concreto foi realizada conforme as recomendações da norma ASTM C215-91 (*Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional frequencies of concrete specimens*), utilizando o método da ressonância por impacto. A instrumentação utilizada compõe-se de um acelerômetro piezelétrico (marca BRÜEL & KJAER, modelo 4383), um martelo pequeno e um sistema de aquisição e análise de dados computadorizados, marca Vishay, modelo System 6000.

Os corpos-de-prova foram apoiados em pontos nodais, para permitir a vibração livre desses. Nos apoios foram utilizadas molas metálicas com frequência natural muito inferior à frequência dos corpos-de-prova. A vibração causada pelo impacto do martelo foi então medida pelo acelerômetro, fixado através de imã em uma chapa metálica previamente colada no corpo-de-prova. Os sinais foram registrados com uma taxa de aquisição de 10 kHz.

O acelerômetro piezelétrico é geralmente utilizado para medir vibrações, devido ao seu tamanho pequeno, boa sensibilidade nas medidas e capacidade para medir uma faixa grande de frequências de vibrações. São auto-geradores de sinal, não necessitando de uma fonte de alimentação. Essencialmente são constituídos de uma base, de um cristal piezelétrico e uma massa sísmica, conforme figura 23. O cristal piezelétrico contém moléculas com distribuição assimétrica de carga elétrica. Quando uma pressão é aplicada, o cristal se deforma e ocorre um deslocamento relativo das cargas positivas e negativas dentro do cristal. Esse deslocamento das cargas internas produz cargas elétricas externas de sinais opostos nas duas superfícies do cristal. Assim, quando o cristal é deformado por esforços mecânicos, produz um sinal elétrico proporcional à deformação.

No acelerômetro, o cristal está sempre comprimido com a massa sísmica. Durante a vibração, essa força de compressão pode aumentar ou diminuir, dependendo da intensidade e do sentido da vibração, gerando um sinal (carga elétrica) que pode ser relacionado através de uma calibração, com a aceleração da massa sísmica.

Os sinais elétricos do acelerômetro são enviados para o sistema de aquisição de dados, convertidos para valores de aceleração em função do tempo, registrados e processados para a obtenção das frequências naturais.

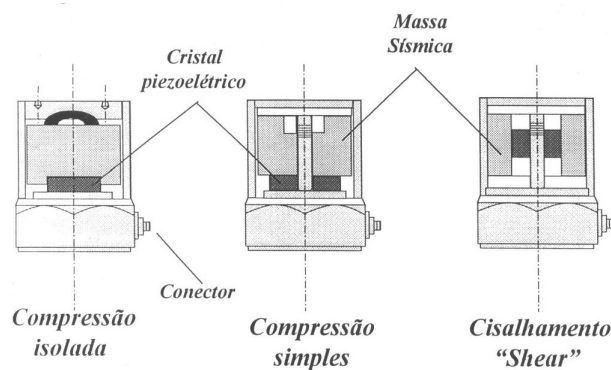


Figura 23. Modelos de acelerômetros piezoelétricos. Fonte: Dally, Rilley, McConnel (1984).

No processamento, o sinal da amplitude de aceleração no domínio do tempo é convertido para o domínio da frequência, utilizando o algoritmo denominado por Transformada Rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transformer), como pode ser observado na figura 24.

O sinal da amplitude de aceleração em função do tempo, que é um sinal periódico, é, então, escrito como uma soma de funções harmônicas do tipo seno e cosseno (figura 25). A obtenção das frequências transversal, longitudinal e torsional dependem da locação apropriada do acelerômetro na superfície do corpo-de-prova.

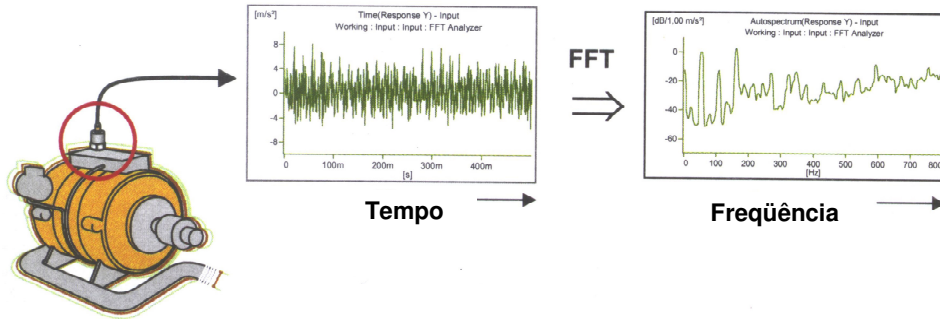


Figura 24. Conversão da resposta do corpo-de-prova no domínio do tempo para o domínio da frequência. Fonte: Kjaer (1988).

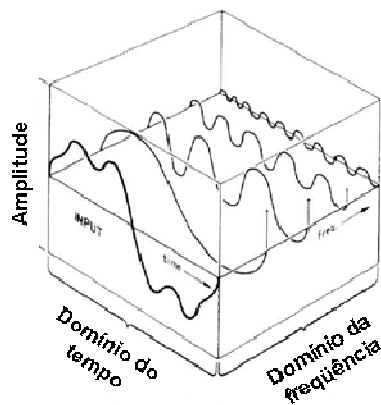


Figura 25. Conceito da Transformada de Fourier. Fonte: Dally, Rillely, McConnel (1984).

Foram utilizados dezoito corpos-de-prova, sendo nove em concreto com ar incorporado e nove para o concreto sem ar incorporado, que foram ensaiados para determinação da frequência natural. Oito corpos-de-prova de cada série foram acondicionados na câmara fria e um corpo-de-prova foi mantido em temperatura ambiente, a fim de permitir as comparações entre as frequências naturais obtidas para concretos submetidos a baixas temperaturas e concretos sob condições normais de temperatura.

A curva de resfriamento dos corpos-de-prova está representada na figura 26, sendo a taxa de resfriamento calculada em  $-0,11^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

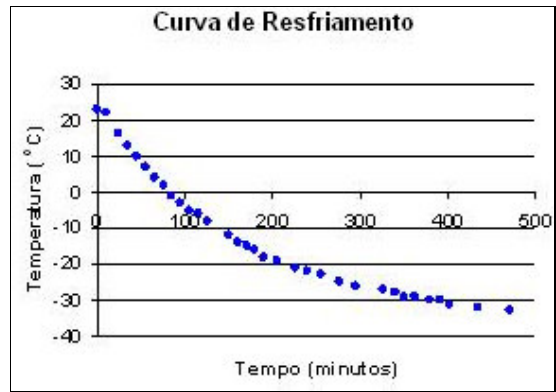


Figura 26. Curva de resfriamento dos corpos-de-prova. Fonte: Lima (2006).

A figura 27 mostra o ensaio para a determinação da frequência transversal natural do corpo-de-prova.

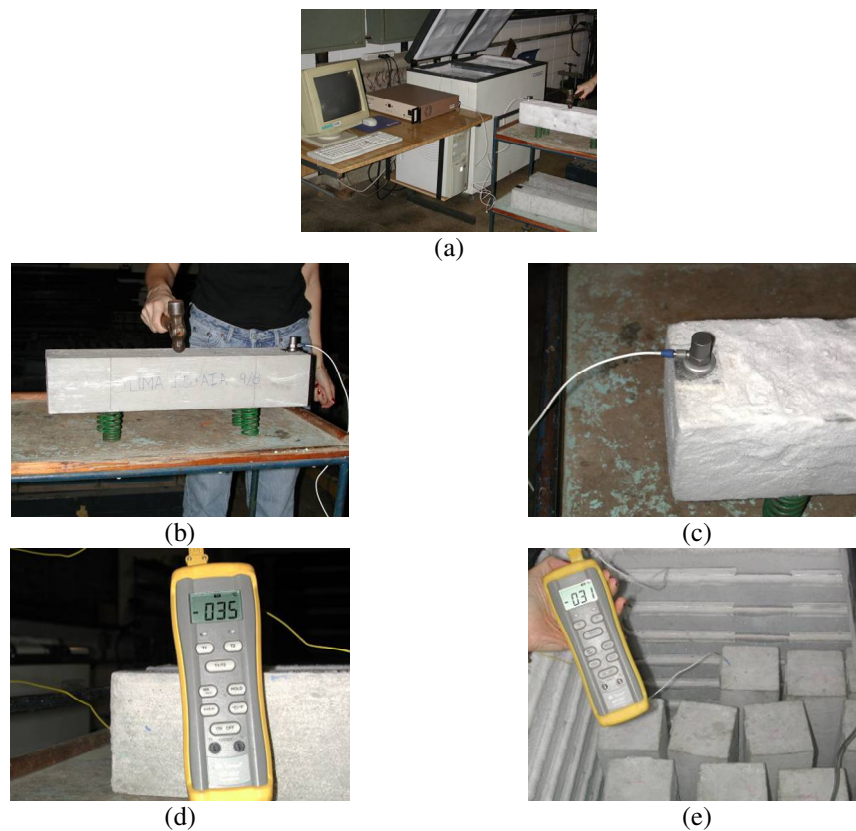


Figura 27. (a) Sistema processador de sinais para leitura da frequência natural; (b) ensaio de corpo-de-prova para determinação da frequência natural; (c) Detalhe do acelerômetro (captador de sinais); (d) Termômetro para aferição da temperatura interna do corpo-de-prova e; (e) da câmara fria. Fonte: Lima (2006).

### 2.5.3 Desempenho do CAD frente às baixas temperaturas

Os valores das freqüências naturais foram obtidos a partir da leitura de um gráfico cartesiano do tipo (X,Y), sendo o eixo das abscissas a freqüência natural e o eixo das ordenadas a amplitude, elaborado pelo sistema de conversão de sinais. A figura 28 ilustra os gráficos correspondentes às leituras iniciais, intermediárias, finais e após o descongelamento de um corpo-de-prova de cada série.

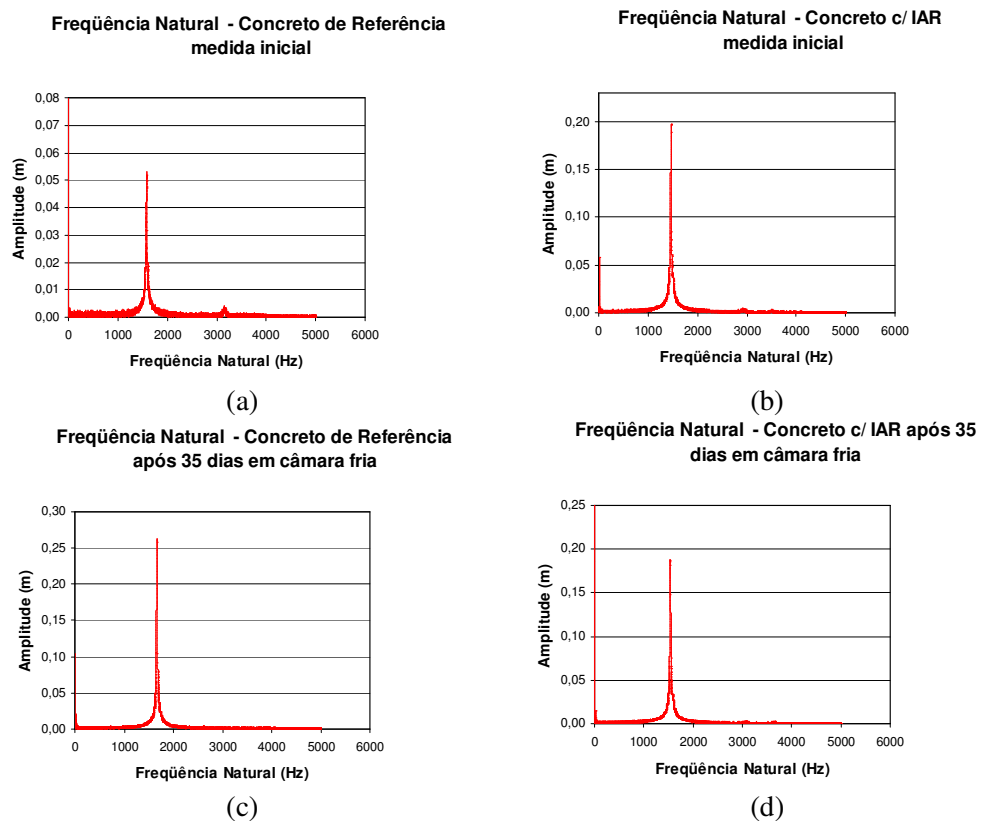


Figura 28. Curvas para obtenção da freqüência natural em diversas idades para os concretos ensaiados a baixas temperaturas. Fonte: Lima (2006).

Os resultados obtidos por estes ensaios estão expressos na tabela 4 para as duas séries: concretos com ar incorporado e sem ar incorporado. O corpo-de-prova de cada série mantido fora da câmara fria está identificado pela sigla (CTRL), a fim de

permitir as comparações entre as frequências naturais obtidas para concretos submetidos a baixas temperaturas e concretos sob condições normais de temperatura.

Tabela 4 – Frequência natural obtida para os corpos-de-prova para várias idades

Série	CP	Temperatura °C	$n_0$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
			Hz Inicial	Hz 1 dia	Hz 7 dias	Hz 14 dias	Hz 21 dias	Hz 28 dias	Hz 35 dias
Conc reto c/6% ±1% de ar incor pora do	CTRL	23±2	1466	1464	1465	1458	1452	1456	1453
	1	-35±2	1462	1482	1542	1540	1538	1541	1536
	2	-35±2	1483	1502	1559	1558	1559	1560	1560
	3	-35±2	1467	1485	1543	1542	1543	1545	1542
	4	-35±2	1450	1446	1526	1523	1520	1523	1519
	5	-35±2	1461	1478	1534	1533	1533	1537	1538
	6	-35±2	1451	1434	1528	1525	1524	1527	1519
	7	-35±2	1439	1434	1510	1508	1504	1508	1505
	8	-35±2	1459	1469	1528	1523	1526	1530	1530
Série	CP	Temperatura °C	$n_0$ Hz Inicial	$n_1$ Hz 1 dia	$n_2$ Hz 7 dias	$n_3$ Hz 14 dias	$n_4$ Hz 21 dias	$n_5$ Hz 28 dias	$n_6$ Hz 35 dias
Conc reto sem ar incor pora do	CTRL	23±2	1593	1588	1589	1580	1576	1579	1582
	1	-35±2	1586	1606	1656	1655	1656	1656	1655
	2	-35±2	1582	1574	1655	1657	1654	1656	1654
	3	-35±2	1590	1617	1666	1669	1666	1669	1667
	4	-35±2	1600	1626	1675	1673	1673	1676	1676
	5	-35±2	1602	1624	1678	1678	1676	1679	1678
	6	-35±2	1582	1575	1657	1655	1650	1654	1650
	7	-35±2	1586	1586	1664	1661	1658	1658	1650
	8	-35±2	1570	1580	1637	1637	1638	1640	1640

Fonte: Lima (2006).

A figura 29 mostra graficamente a evolução da frequência natural para cada corpo-de-prova.

Sendo observada a estabilização dos valores das frequências naturais, fez-se a leitura no trigésimo quinto dia de exposição, à baixa temperatura, e os corpos-de-prova foram deixados à temperatura ambiente até entrarem em equilíbrio termodinâmico, ou seja, atingirem a temperatura ambiente.

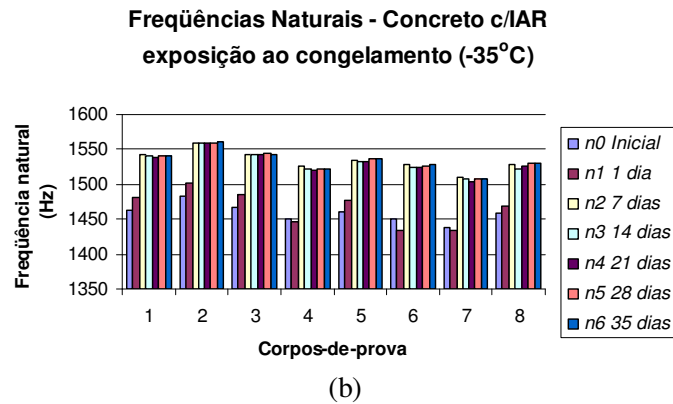
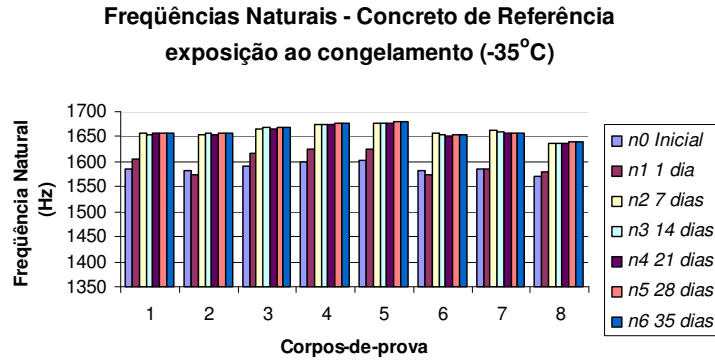


Figura 29. Valores de frequência ( $n$ ) para os corpos-de-prova de concreto ensaiados à -35°C: (a) concreto de referência (b) concreto com ar incorporado (6±1%); Fonte: Lima (2006).

A figura 30 e a tabela 5 expressam os valores das frequências naturais dos corpos-de-prova de concreto à temperatura ambiente antes e após o período em que foram submetidos às baixas temperaturas.

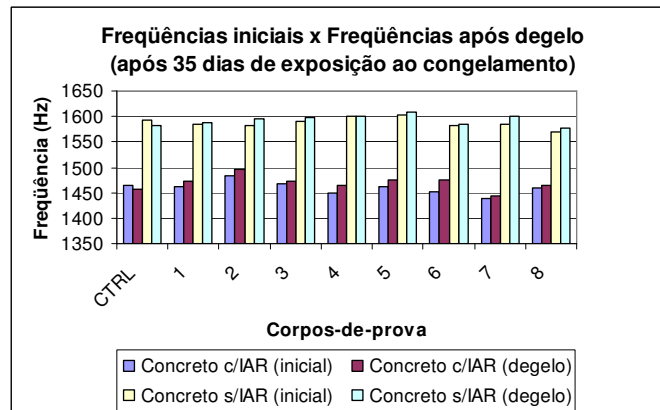


Figura 30. Frequência natural após o período de 35 dias de exposição ao congelamento. Fonte: Lima (2006).



Tabela 5 - Frequência transversal natural de corpos-de-prova prismáticos 10 cm x 10 cm x 50 cm após 35 dias de exposição à baixa temperatura.

Série	CP	Temperatura °C	<i>n</i>	<i>n</i>
			Hz	Hz
			Inicial	Final
<b>Conc reto c/6± 1 de ar incor pora do</b>	CTRL	23±2	1466	1458
	1	23±2	1462	1473
	2	23±2	1483	1496
	3	23±2	1467	1472
	4	23±2	1450	1466
	5	23±2	1461	1475
	6	23±2	1451	1474
	7	23±2	1439	1445
	8	23±2	1459	1466
<b>Conc reto sem ar incor pora do</b>	CTRL	23±2	1593	1582
	1	23±2	1586	1588
	2	23±2	1582	1596
	3	23±2	1590	1599
	4	23±2	1600	1601
	5	23±2	1602	1608
	6	23±2	1582	1586
	7	23±2	1586	1600
	8	23±2	1570	1577

Fonte: Lima (2006).

Os resultados da tabela 5 estão representados graficamente pela figura 28.

Com estes resultados, comprovou-se a sanidade de todos os corpos-de-prova submetidos à temperatura de -35°C, para ambos os concretos: com ar incorporado e sem ar incorporado.

Os resultados mostraram que tanto o concreto com ar incorporado como o concreto sem ar incorporado não só resistiram ao processo do congelamento, como tiveram suas frequências naturais aumentadas durante o congelamento.

Esse aumento foi de 5% para o concreto com ar incorporado e de 4,5% para o concreto de referência, sendo que esses valores cresceram até o 7º dia de exposição ao congelamento, e então permaneceram constantes.

O aumento na frequência foi atribuído ao fato de que a água congelável nos concretos passou para o estado sólido, aumentando a rigidez e conseqüentemente a frequência, além do fato de que, com o aumento do volume da água, mais poros foram preenchidos e também contribuíram para esse aumento.

Entretanto, mesmo com a constância dos valores da frequência natural antes e após o congelamento dos corpos-de-prova foram registradas alterações volumétricas, que foram analisadas a partir da utilização de extensômetros mecânicos colocados superficialmente, nas três direções (x, y, z), aferidos por meio de um tensotast.

Nesse caso, utilizou-se um Tensotast da marca Huggenbergh, com precisão de milésimo de milímetro (figura 31).

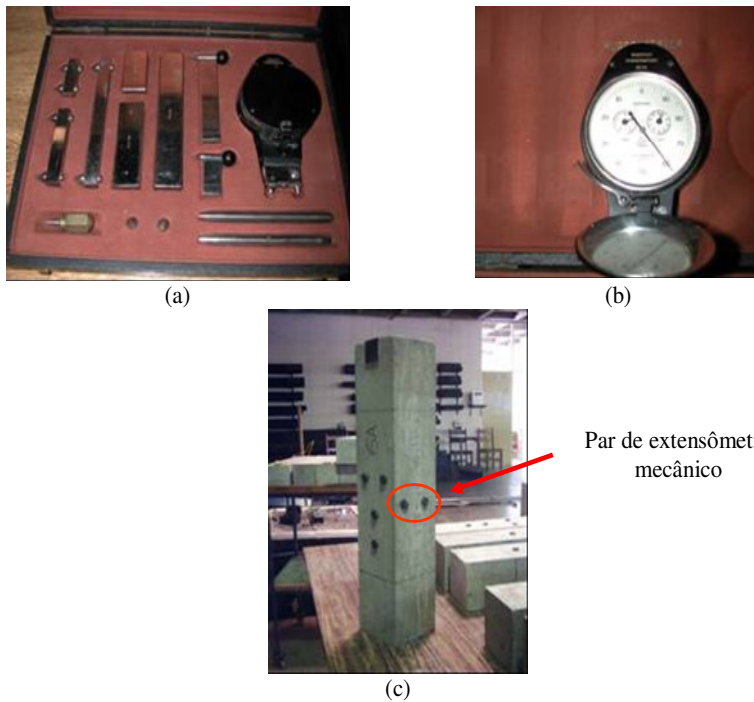


Figura 31. (a) Relógio medidor Tensotast e conjunto de barras de calibração; (b) Tensotast; (c) Corpo-de-prova instrumentado com extensômetros mecânicos. Fonte: Lima (2006).

A figura 32 mostra a realização do ensaio para obtenção das leituras pelo Tensotast



Figura 32. (a) Corpo-de-prova instrumentado com as bases do extensômetro mecânico; (b) Procedimento de leitura. Fonte: Lima (2006).

Os valores máximos para as deformações ocorridas para os concretos sem ar incorporado foram de 0,54‰ de contração e 0,67‰ de expansão, ocorridos durante a exposição ao congelamento. Para o concreto com ar incorporado, os valores máximos foram de 0,32‰ de contração e 0,65‰ de expansão.

Ao serem retirados da câmara de congelamento e deixados em ambiente de laboratório, após atingirem o equilíbrio térmico, os corpos-de-prova com ar incorporado apresentaram a maior deformação residual de 0,23‰ de expansão, e os corpos-de-prova sem ar incorporado permaneceram com a maior deformação residual de 0,28‰ de expansão.

Para ambos os concretos, com ar incorporado e sem ar incorporado, a deformação residual não foi prejudicial ao desempenho deles, uma vez que a frequência transversal natural, determinada após o descongelamento dos corpos-de-prova,

manteve-se igual à frequência inicialmente aferida, antes de expô-los ao congelamento (tabela 5).

Essa experiência envolvendo os conceitos existentes com os concretos de alto desempenho permitiu que se estabelecesse uma base de conhecimentos de concretos executados para atuar em baixas temperaturas, podendo-se, de início, já vislumbrar alguns aspectos relacionados com a durabilidade dessas estruturas frente à temperatura de até  $-35^{\circ}\text{C}$ .

Mesmo a presença de vazios de ar no concreto com ar incorporado não foi suficiente para contrapor as forças de crescimento dos cristais de gelo ou a pressão hidráulica gerada durante a depleção da água-gel para os capilares e para os vazios de ar, de modo a evitar a expansão; embora esse fato não tenha sido desfavorável para o bom desempenho dos concretos quando expostos ao congelamento (i.e. as deformações não afetaram a rigidez dos corpos-de-prova).

Para que nenhuma deformação residual (expansão) fosse registrada, e então somente ocorresse contração do início ao fim do período de exposição ao congelamento, para o concreto com ar incorporado, a distribuição dos vazios deve ser o fator a ser melhorado. Já para o concreto sem ar incorporado, o reforço da argamassa com o intuito de melhorar a resistência à tração do concreto deve ser verificado.

Embora a taxa de resfriamento, a temperatura alvo e a condição de temperatura constante a que foram expostos os corpos-de-prova serem fatores determinantes para a predominância do fenômeno da difusão, outros aspectos foram de notável importância para evitar os prejuízos causados pela geração de pressão hidráulica nos concretos estudados.

Entre eles, pode-se destacar a quantidade de água congelável. A relação  $a/agl$  de 0,42, aqui proposta, está bem além da relação de 0,24, demonstrada por Powers (1949) e

mais tarde confirmada por Li, Langan e Ward (1991), dentre outros, como sendo a máxima relação  $a/agl$  para concretos sem ar incorporado para resistirem ao congelamento .

No entanto, mesmo o concreto sem ar incorporado foi durável ao congelamento, evidenciando a eficiência no processo de hidratação, que consumiu a água congelável. Além disso, o refinamento de poros é certamente fator determinante para a durabilidade ao congelamento, posto que a diminuição dos poros cause aumento da tensão superficial na água armazenada ou conduzida até esses vazios, o que implica em menor temperatura de congelamento.

Atribuindo-se às adições minerais (i.e. sílica ativa de ferro silício) o refinamento de poros, deve-se enfatizar o reforço da matriz de cimento pela maior quantidade de C-S-H produzida em virtude da reação pozolânica desencadeada por estas adições (MELO, 2000), sendo esta propriedade também benéfica à durabilidade ao congelamento.

A evolução na tecnologia do concreto, possibilitada pela montagem de aglomerantes, favorece o desempenho dos concretos frente às adversidades, fator incontestável e de suprema importância para o alto desempenho, haja vista a diferença entre os aglomerantes disponíveis hoje e há tempos atrás.

Os aglomerantes utilizados por Powers, para desenvolver as teorias ora apresentadas para concretos com relação  $a/agl$  de 0,30, permitiam que toda água congelável nele armazenada (i.e. água capilar e água contida nas cavidades), congelasse a  $-15^{\circ}\text{C}$ . Em 1998, Ukamoto e Uomoto elaboraram argamassas com relação  $a/agl$  0,30, e à temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$ , e constataram que a água congelou-se somente nos poros maiores que  $0,05\ \mu\text{m}$ .

A ausência de danos que afetassem a rigidez (i.e. medida pela frequência transversal natural) dos concretos, com e sem ar incorporado, quando submetidos à temperatura de  $-35^{\circ}\text{C}$ , causados principalmente pela geração de pressão hidráulica, atribuída ao movimento da água capilar, são evidências do refinamento de poros. Por analogia ao trabalho de Ukamoto e Uomoto (1998) conclui-se que boa parte dos poros desses concretos é menores que  $0,05\ \mu\text{m}^{13}$  (LIMA,2006).

Outrossim, o fenômeno da pressão hidráulica foi minimizado pelo avançado grau de hidratação, alcançado com o período de cura de 28 dias em câmara úmida. Além disso, ações direcionadas à prevenção das retrações autógena, plástica e por secagem, logo após o lançamento e até a desmoldagem e acomodação dos corpos-de-prova em câmara úmida, foram imprescindíveis para a durabilidade do concreto frente a baixas temperaturas.

Outros fatores foram relevantes na obtenção da durabilidade do concreto frente às baixas temperaturas, os quais concorreram para a elaboração de um concreto coeso, pouco permeável e com melhoria da zona de interface pasta/agregado. Tais fatores foram alcançados por meio de um método adequado de dosagem e mistura do concreto.

---

<sup>13</sup> O diâmetro dos poros do concreto elaborado por Lima (2006) foi determinado por ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, apresentados nas seções seguintes, os quais comprovaram esta analogia.

### 3. A MICROESTRUTURA DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

#### 3.1 A arquitetura da microestrutura do concreto

O concreto é, tradicionalmente, definido como um compósito formado por partículas de agregados, relativamente inertes<sup>14</sup>, com diversos tamanhos e distribuições e de composição mineralógica variável, solidarizados por uma matriz de pasta de cimento hidratada. Sendo assim, sua microestrutura é característica de um material compósito, constituída de agregados, pasta de cimento e a interface entre eles.

A matriz endurecida é originária das reações de hidratação entre o cimento Portland e água. Entretanto, em adição aos agregados, à água e ao cimento Portland, os concretos modernos ou concretos de alto desempenho contêm, geralmente, ao menos um dos ingredientes seguintes: aditivos químicos, materiais pozolânicos, fibras naturais ou sintéticas, e fibras metálicas. Além dos ingredientes ora citados, no caso do concreto estrutural, ainda podemos citar as armaduras passivas ou ativas.

Assim, Mindess (1998) relacionou as várias interfaces presentes no concreto moderno a saber:

- a. As várias fases que compõem a pasta de cimento hidratada (PCH);
- b. A pasta de cimento hidratada e os grãos de cimento anidros;
- c. A pasta de cimento hidratada e os materiais pozolânicos ainda por reagir;
- d. A pasta de cimento hidratada e os agregados;
- e. A pasta de cimento hidratada e as fibras descontínuas;
- f. A pasta de cimento hidratada e as armaduras passivas ou ativas;

---

<sup>14</sup> Entende-se por inertes agregados miúdos e graúdos que pela dimensão com que são utilizados na dosagem não reagem quimicamente ou por outras forças de origem intra-particular entre eles e a pasta de cimento hidratada.

g. As fases sólidas com os vazios preenchidos com ar ou água.

A essa lista relacionada por Mindess (1998), Liborio (2003) adiciona, ainda, como prováveis interfaces, as ligações entre o concreto e os demais materiais a ele solidarizados, tais como: a interface de ligações de concreto velho com concreto novo, nichos de concretagem, ligação de estruturas de concreto com estruturas metálicas, dentre outras.

A durabilidade do concreto está fortemente relacionada à qualidade das inúmeras interfaces nele presente. Pode-se dizer que esta é a chave para a produção de um concreto de alto desempenho. Para cada aplicação do concreto, há que se investigar a interface de maior influência em seu desempenho e então reforçá-la.

O grupo de pesquisa do Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento (LMABC), da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo desenvolveu uma série de técnicas relacionadas ao tratamento de interface, possibilitando grandes avanços em diversas áreas relacionadas à durabilidade do concreto, tais como: ataque de cloretos, carbonatação, abrasão, concreto de segurança, resistência ao fogo e durabilidade ao congelamento e ciclos de gelo e degelo, tema principal desta pesquisa.

A figura 33 esquematiza as várias interfaces de um concreto de alto desempenho.

Cada uma das técnicas apresentadas na figura 34 deve ser aplicada a partir do entendimento dos mecanismos que solicitarão o concreto em seu ambiente de utilização. O cientificismo no projeto e produção de concretos de alto desempenho encontra-se justamente pautado nesse conhecimento.

Assim, no caso desta pesquisa, concretos para ambientes com baixas temperaturas, a quantidade de água congelável, a distribuição dos vazios de ar e a



capacidade de resistir aos movimentos migratórios da água nos capilares são vitais para o alto desempenho.

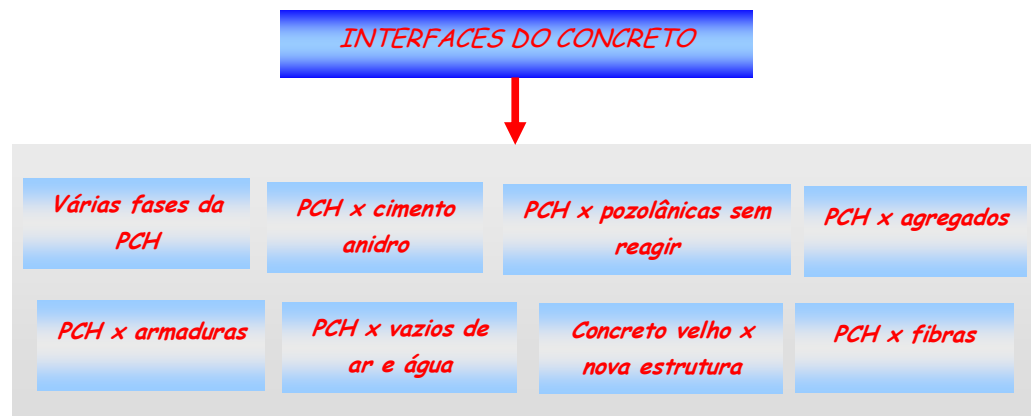


Figura 33. Principais interfaces do concreto.

A figura 34 apresenta as diversas técnicas estudadas e aprimoradas pelo grupo de pesquisadores do LMABC para o melhoramento do desempenho dessas interfaces.



Figura 34. Técnicas para melhorar o desempenho das diversas interfaces no concreto<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Leia mais sobre as técnicas de melhoramento de interface em: Liborio (2003), Lima (2006), Liborio e Castro (2004, 2007), Fagury (2002), Melo (2000).

Medidas relacionadas com tais parâmetros foram as diretrizes que nortearam o projeto do CAD desenvolvido por Lima (2006), conferindo-lhe resistência ao congelamento.

Para esta nova etapa, onde a resistência do CAD a ciclos de gelo/degelo será analisada, novas medidas serão adotadas para alcançar o alto desempenho nessa situação de exposição, a partir da análise da microestrutura do concreto resistente ao congelamento.

Dentre as técnicas citadas na figura 34, vale ressaltar para esta pesquisa, o reforço da matriz da pasta de cimento, obtida pela montagem do aglomerante. Conforme descrito no item 2.5.1, o aglomerante utilizado para a produção do CAD resistente ao congelamento é constituído de cimento Portland CP II 32 E e 10% de sílica ativa em substituição volumétrica. O cimento CP II 32 E, segundo dados do fabricante, tem 32 % de escória em sua constituição.

Juntamente com as demais técnicas empregadas, a montagem desse aglomerante permitiu a formação de uma densa matriz de pasta de cimento. A reação pozolânica, oriunda tanto da interação da sílica ativa quanto da escória com a portlandita da pasta de cimento, produz uma microestrutura diferente das pastas sem tais adições, com as interfaces entre as pequenas partículas de C-S-H praticamente indistintas (MINDESS, 1998).

### **3.2 Análise da microestrutura do concreto a partir da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectro de energia dispersiva de raio-X (EDS)**

A microscopia eletrônica de varredura é uma poderosa ferramenta para análise qualitativa e quantitativa da microestrutura de materiais diversos. Ela consiste em

irradiar um micro volume de uma amostra de material por um fino feixe de elétrons, em alta velocidade. Esse feixe de elétrons, ao atingir a amostra, produz a emissão de uma série de radiações, tais como: elétrons secundários, elétrons retro espalhados, raios-X característicos, elétrons Auger, fótons, etc. A captação correta dessas radiações produzirá imagens e informações que permitirão analisar aspectos referentes à topografia da superfície, composição química, cristalografia, etc. (MALISKA, 2008).

Segundo Diamond (2004), a microscopia eletrônica por varredura, permite um claro entendimento da arquitetura da pasta de cimento hidratada e de maneira superior a qualquer outro tipo de ensaio. Diamond (2004) prossegue relacionando a qualidade dos produtos de hidratação da pasta de cimento a vários fatores, dentre eles: as características químicas e à finura dos aglomerantes, a utilização de aditivos, as variações no procedimento de dosagem e mistura do concreto, além dos procedimentos de adensamento e cura do concreto.

As imagens são produzidas em tons de cinza com uma gama de 256 tonalidades. Os tons mais escuros representam produtos mais porosos e os tons mais claros representam produtos menos porosos (DIAMOND, 2004). Além da tonalidade, as imagens também apresentam diferentes intensidades de brilho, sendo essa relacionada também à porosidade: quanto mais brilhante menos porosa será a fase analisada. Essa diversidade de nuance também representa diferença na composição química.

Para identificar as diversas fases do concreto nas imagens produzidas pela microscopia eletrônica de varredura, são necessários conhecimentos específicos sobre cada uma delas. Assim, seguindo a relação citada por Mindess (1998), serão apresentados os traços mais relevantes para caracterização das mesmas.

A pasta de cimento hidratada é composta principalmente por dois elementos: o silicato de cálcio hidratado, C-S-H gel, e o hidróxido de cálcio, CH. O C-S-H gel é

composto por partículas de cálcio, sílica e água, oriundos do processo de hidratação do  $C_2S$  e do  $C_3S$ , silicato dicálcico e silicato tricálcico, respectivamente, constituintes do clínquer do cimento Portland. Numa mesma pasta de cimento, a constituição e porosidade do C-S-H gel pode variar (DIAMOND, 2004). A porosidade do C-S-H gel é menor quando o processo de hidratação que o originou ocorrer por difusão iônica, sendo, nesses casos, designados por produtos internos. Os processos de hidratação por dissolução-precipitação dão origem à C-S-H gel de maior porosidade e são designados por produtos de hidratação externos (SCRIVENER, 1989).

O hidróxido de cálcio (CH) apresenta-se em forma de placas hexagonais em amostradas onde a topografia da superfície foi preservada (MELLO, 2000). Já em amostras polidas, o CH apresenta-se como massas amorfas. O CH apresentam brilho mais intenso que o C-S-H (DIAMOND, 2004).

Etringita e (AFt) e Monossulfatos aparecem comumente nos interiores de vazios e estão mais relacionados com produtos externos de hidratação. Entretanto, é muito difícil de identificar tais produtos de hidratação, sendo recomendada a análise por EDS para a sua confirmação (DIAMOND, 2004). A figura 35 apresenta micrografias que ilustram algumas das diversas fases da pasta de cimento hidratada.

Grãos de cimento anidro são encontrados na maioria das pastas de cimento. É possível a identificação dos componentes do clínquer, os quais apresentam-se na forma cristalina, com tamanhos que variam de 1  $\mu\text{m}$  a 60  $\mu\text{m}$ . No entanto, os diâmetros típicos estão compreendidos entre 2  $\mu\text{m}$  a 80  $\mu\text{m}$ . Os maiores grãos são compostos normalmente por  $C_3A$  e  $C_4AF$ . Essas estruturas requilares são identificadas por superfícies mais brilhantes e claras, envolvidas por produtos de hidratação como C-S-H e CH.

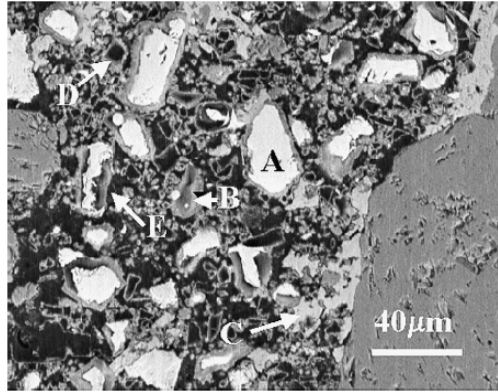
Os vazios de ar aparecem contornados por finos filmes de hidróxido de cálcio, são esféricos e aparecem em tons muito escuros, como pode ser visto na figura 36.

Nem sempre é possível identificar as fases do concreto por mera observação das micrografias eletrônicas de varredura. Nesses casos lança-se mão do recurso dos espectros de energia dispersiva de raio-X.

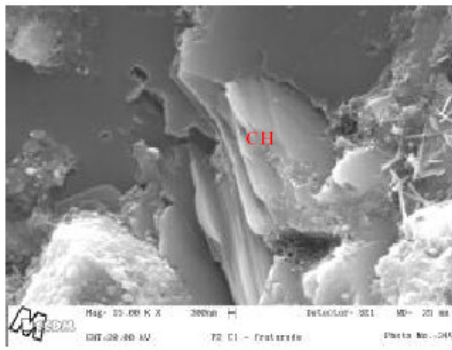
A microanálise é uma técnica muito eficiente para a análise química de materiais orgânicos e inorgânicos. No caso dos espectros de energia dispersiva (EDS) ou de comprimento de onda (WDS) é possível determinar a composição de regiões com até 1 µm de diâmetro. Trata-se de uma técnica não destrutiva, baseada na identificação dos raios-X emitidos pela amostra quando da interação com o feixe eletrônico. Os espectros de EDS ou WDS resultam em composições químicas, quantitativas, bastante precisas, sendo possível determinar quantidades de elementos, presente em pequenas porcentagens nas amostras, em percentuais de até 1% (MALISKA, 2008).

Taylor e Newbury (1983), Sarkar, Chandra e Berntsson (1992), Richardson (2008), dentre outros, desenvolveram uma série de investigações sobre a composição química da pasta, argamassa e concreto de cimento Portland. Esses pesquisadores estabeleceram relações entre as quantidades dos elementos químicos constantes nos espectros de energia dispersiva de raio-X, de modo a possibilitar a identificação dos produtos de hidratação do cimento Portland.

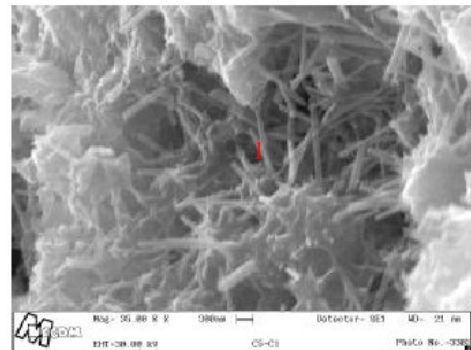
Além da identificação dos produtos de hidratação, tais estudos também permitiram o conhecimento da cristalografia dos produtos de hidratação e das variações na composição química dos produtos de diferentes tipos de aglomerantes.



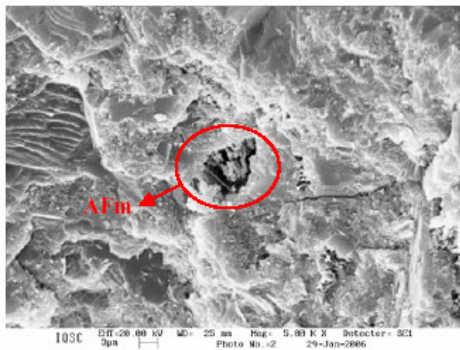
Micrografia de amostra polida de concreto. A- grão de cimento anidro; B - Produto de hidratação interno - C-S-H; C - Hidróxido de cálcio; D- Produtos de hidratação externa - C-S-H; E - Grão de Hadley. Fonte: Diamond (2004).



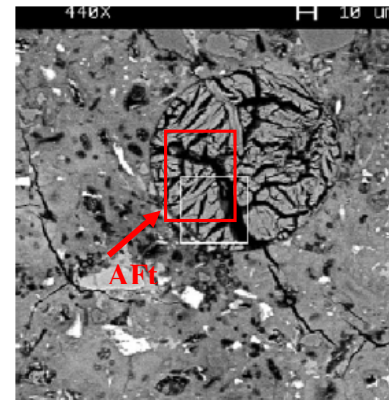
Superposição de placas hexagonais de hidróxido de cálcio em uma amostra fraturada de concreto. Fonte: Melo (2000).



Fibras de C-S-H nas bordas de um grão de cimento sem hidratação. Fonte: Melo (2000)

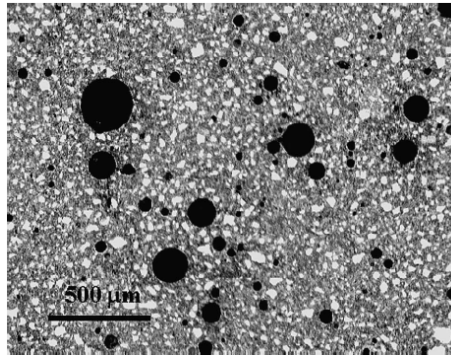


Micrografia de uma amostra fraturada de concreto numa região onde foi retirado um grão de agregado. Fonte: SILVA, F.G., 2006



Micrografia de uma amostra polida. Etringita (AFt) depositada num vazio de ar. Fonte: Diamond, 2004.

Figura 35. Características das diversas fases da pasta de cimento hidratada em amostras de concreto polidas e fraturadas de concreto.



Vazios de ar numa amostra de concreto polido.  
Fonte: Diamond (2004).



Vazios de ar numa amostra fratura de concreto.

Figura 36. Micrografias de concreto em amostras polidas e fraturas – identificação dos vazios de ar incorporado.

A tabela 6 apresenta as relações entre os elementos químicos identificados na microanálise por EDS, e os relaciona ao produto de hidratação da pasta, argamassa ou concreto de cimento Portland.

Tabela 6 - Relação entre elementos químicos obtidos em microanálises e a correspondência com o produto de hidratação do cimento Portland

Relação entre os elementos químicos				Produtos de Hidratação
Si/Ca	(Al + Fe)/Ca	Mg/Ca	S/Ca	
$\geq 0,4$	$< 0,2$	$< 0,2$	--	C-S-H
$< 0,1$	$< 0,1$	$< 0,2$	$\leq 0,04$	CH
$< 0,5$	$\geq 0,2$	$< 0,2$	--	Al e Fe
$\geq 0,2$	$\geq 0,5$	$< 0,2$	$\leq 0,04$	Hidrogranada
$\geq 0,25$	$> 0,4$	$< 0,2$	$> 0,15$	AFm

Alguns exemplos de identificação dos produtos de hidratação estão ilustrados na figura 37.

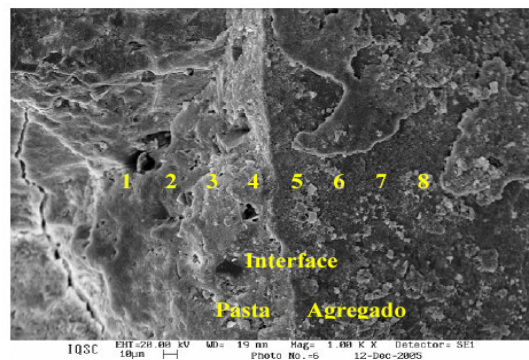


Figura 37. EDS em linha para verificar os elementos presentes na região da pasta de cimento com e sem agregado. Fonte: V. Silva. (2007).

A tabela 7 apresenta os resultados da análise quantitativa obtida em EDS e a aplicação das relações propostas por Taylor e Newbury (1983) para identificação dos produtos de hidratação do cimento Portland.

Tabela 7 – Resultados da espectrografia por dispersão de energia (EDS) referente à figura 37.

<b>Elementos</b>	<b>Ponto 1</b>	<b>Ponto 2</b>	<b>Ponto 3</b>	<b>Ponto 4</b>	<b>Ponto 5</b>	<b>Ponto 6</b>	<b>Ponto 7</b>	<b>Ponto 8</b>
	<b>M.At.*</b>	<b>M.At.*</b>	<b>M.At.*</b>	<b>M.At.*</b>	<b>M.At.*</b>	<b>M.At.*</b>	<b>M.At.*</b>	<b>M.At.*</b>
C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,40	0,00	11,87
O	42,61	53,40	47,74	58,82	34,53	59,22	46,48	51,57
Mg	2,50	0,00	0,00	5,84	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	2,57	0,00	1,83	3,39	0,00	0,00	0,00	0,00
Si	19,32	6,40	14,96	14,57	6,56	2,89	6,23	19,71
K	1,76	0,00	1,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	39,03	40,37	30,98	16,61	58,91	31,49	57,46	37,94
Fe	0,00	0,00	5,97	0,00	0,00	0,00	0,00	2,64
<b>Relação entre os elemento e identificação dos produtos formados</b>								
Si/Ca	0,50	0,16	0,48	0,88	0,11	0,09	0,11	0,52
(Al+Fe)/Ca	0,07	0,00	0,25	0,20	0,00	0,00	0,00	0,07
S/Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg/Ca	0,06	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Produtos</b>	<b>C-S-H</b>	<b>CH</b>	<b>C-S-H</b>	<b>C-S-H</b>	<b>CH</b>	<b>CaCO<sub>3</sub></b>	<b>CH</b>	<b>CaCO<sub>3</sub></b>

M.At.\* = Massa atômica (%) - Fonte: V. Silva (2007)

As micrografias da figura 38 ilustram a densa matriz da pasta de cimento e interface entre agregados e bolhas de ar do concreto desenvolvido por Lima (2006), o qual apresentou alto desempenho frente ao congelamento e que servirá de base para a essa nova etapa da pesquisa. Para a interpretação dessas micrografias serão aplicadas as técnicas ora exposta.



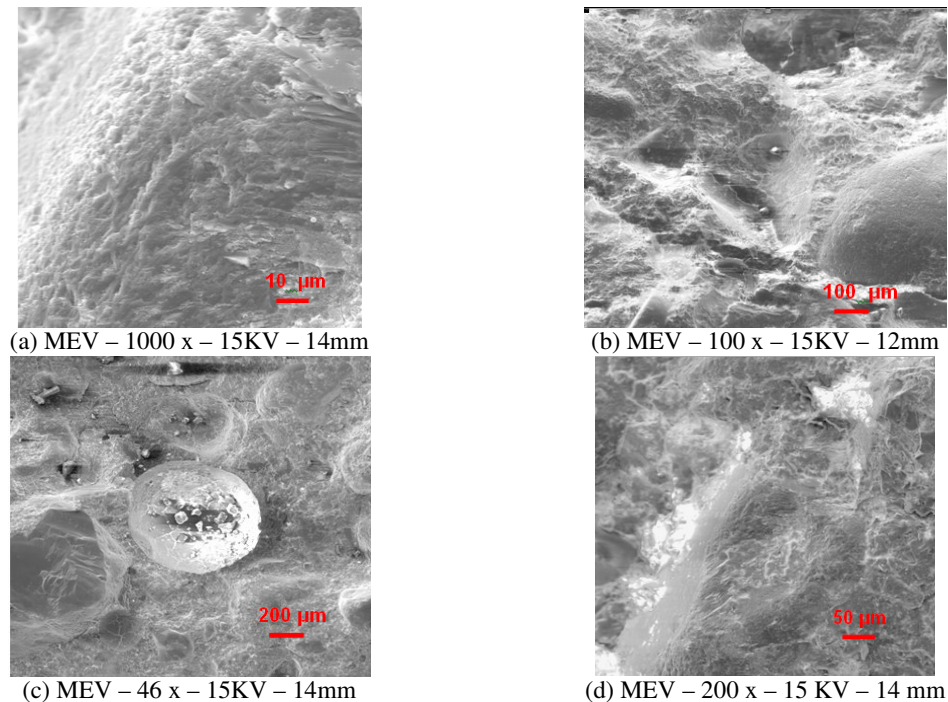


Figura 38. Microscopia eletrônica de varredura do CAD para baixas temperaturas – a/agl 0,42; 1:m, m=5,  $f_{ck} = 57$  MPa. (a) Superfície do agregado; (b) e (c) interface pasta agregado e (d) Matriz da pasta de cimento.

### 3.3 Análise da microestrutura do concreto a partir de ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)

Porosimetria por intrusão de mercúrio é uma técnica que consiste em acondicionar uma amostra de material em uma câmara, envolvê-la com mercúrio, aplicar incrementos de pressão e medir o volume de mercúrio que penetrou na amostra.

A análise dos resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio possibilita obter informações sobre a resistência, permeabilidade e durabilidade de determinados materiais (Cook , Hover; 1993).

Os resultados são expressos em gráficos cujas ordenadas são: o volume de mercúrio intrudido versus a pressão aplicada sobre o mercúrio. A partir da equação (21)

de Washburn (1921)<sup>16</sup> *apud* Cook e Hover (1993) é possível relacionar a pressão que causa a entrada do mercúrio na amostra com o tamanho do poro.

$$d = \frac{-4\gamma \cos \theta}{p} \quad (21)$$

Onde:

d = diâmetro equivalente do poro intrudido;

$\gamma$  = tensão superficial do mercúrio;

$\theta$  = ângulo de contato entre o mercúrio e a parede do poro;

p = pressão aplicada no mercúrio.

O gráfico do volume acumulado intrudido versus o diâmetro do poro dá origem à curva de porosidade acumulada. O volume acumulado intrudido é dado como porcentagem do volume da amostra. O ponto máximo, pico, dessa curva representa a porosidade total da amostra, no valor da ordenada, e o menor diâmetro equivalente de poro, no valor da abscissa. Esse valor de diâmetro equivalente é designado como tamanho crítico de poro. Quando o mercúrio penetra em poros com esta dimensão de diâmetro, significa que toda a amostra está saturada pelo mercúrio.

Em curvas cujo eixo das ordenadas representa o volume acumulado em ml/g, faz-se necessário multiplicar esse valor pela massa específica da amostra para obter a porosidade total. A forma da curva de porosidade acumulada é característica para cada tipo de material. (COOK, HOVER; 1993).

Para que haja base de comparação entre diferentes trabalhos desenvolvidos com ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, é recomendável que sejam fornecidas informações sobre as condições de realização dos testes, entre elas: cálculo dos

---

<sup>16</sup> WASHBURN, E.W. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material. Proceedings of the National Academy of Sciences, v.7, n.3, p.115-116, March, 1921.

volumes, coeficientes de correção do volume, da pressão, ângulo de contato entre o mercúrio e a parede do poro, tensão superficial do mercúrio (COOK, HOVER; 1993).

Os gráficos das figuras 39 e 40 foram obtidos por Silva (2000) a partir de ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio. Com base nesse ensaio pôde-se verificar a diferença de porosidade e distribuição dos poros para concretos com e sem adição de sílica ativa, como também demonstrar o refinamento de poros, resultante do processo de montagem de aglomerantes.

A porosidade média para o concreto de traço 1:m, m= 4,6 foi de 8,67% para os concretos com sílica ativa e 10,76% para os concretos sem sílica ativa. O poro crítico para os concretos com e sem sílica ativa foram semelhantes, em torno de 0,005  $\mu\text{m}$ . O refinamento é comprovado pela distribuição dos poros, ou seja, para o concreto com sílica ativa, o volume de mercúrio intrudido é praticamente nulo para poros com diâmetro acima de 0,1  $\mu\text{m}$  e, para concreto sem sílica ativa esse valor corresponde a 0,2  $\mu\text{m}$ .

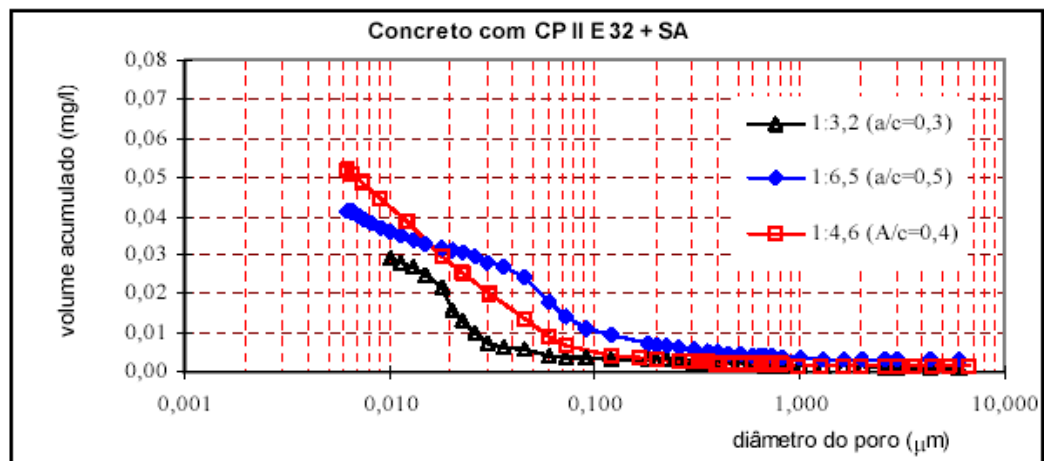


Figura 39. Porosimetria por intrusão de mercúrio - Concretos com adição de 10% de sílica ativa em substituição volumétrica. Fonte: Silva (2000).

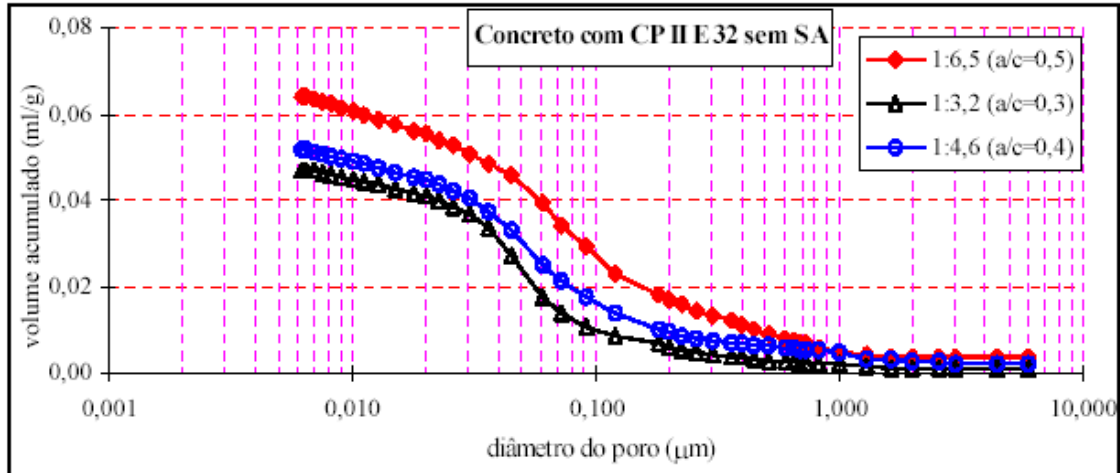


Figura 40. Porosimetria por intrusão de mercúrio - Concretos sem adição de sílica ativa em substituição volumétrica. Fonte: Silva (2000).

### 3.4 Análise da microestrutura do concreto a partir de difratometria de raios-X

A eficiência do processo de montagem de aglomerantes a partir de adições minerais também pode ser observada analisando os resultados de micro análises por difratometria de raios-X. Nesse processo fica evidente o consumo da portlandita pelas reações pozolânicas; por conseguinte, o aumento da fase ligante, C-S-H, em matrizes de cimento assim compostas.

As figuras 41, 42 tratam de difratometrias de raios-X realizadas em pastas de cimento Portland tipo CP II 32 E com e sem adição de sílica ativa, com relação a/agl = 0,40.

A tabela 8 contém os símbolos que expressam as fases presentes nas microanálises das figuras 41 e 42<sup>17</sup>.

<sup>17</sup>Veja no anexo C as características dos materiais constituintes das pastas das figuras 41 e 42.

Tabela 8 – Símbolos para interpretação das difratometrias de raios-X nas pastas de cimento

Símbolos	Descrição
P	Portlandita (CH)
A <sub>13</sub>	Aluminato de cálcio
F	Ferrita anidra
A	Aluminato anidro
S	Silicato anidro
C	Calcita
E	Etringita
CA	Carboaluminato

Obs.: o gel C-S-H é representado pelo “halo” amorfo 34° 2θ

Fonte: Silva (2000).

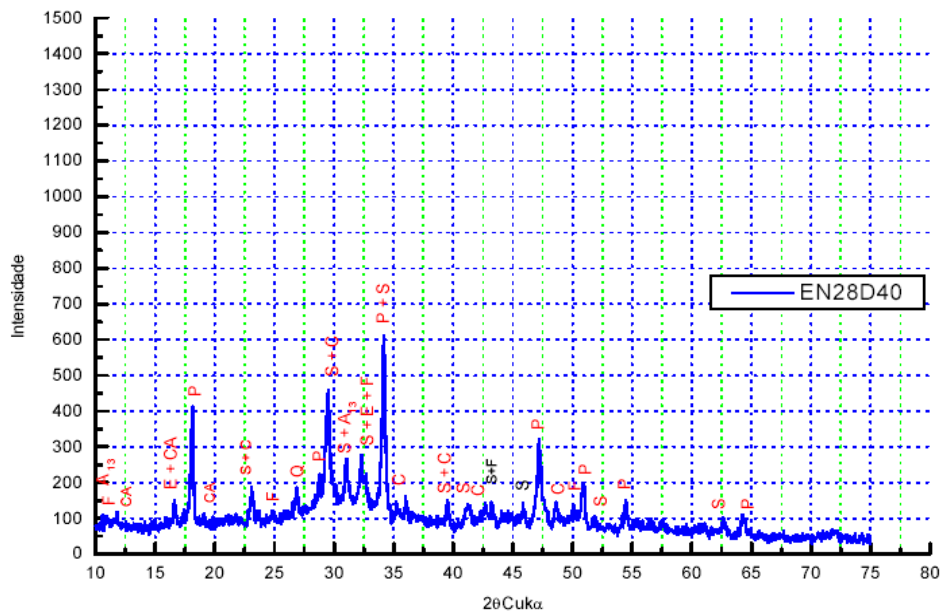


Figura 41. Difratograma para amostra sem adições minerais com 28 dias de idade

(a/agl=0,4).

Fonte: Silva (2000)



A influência dessas condições ora descritas devem-se ao fato do concreto ser um material com propriedades tixotrópicas.

Powers (1968) relata que a palavra “*tixotrópico*” foi inicialmente usada para descrever uma propriedade de uma suspensão aquosa de um óxido de ferro coloidal. Se considerada uma solução coloidal de óxido de ferro com determinada concentração e a ela for adicionada uma pequena quantidade de cloreto de sódio, será observada rapidamente a formação de um gel. Então, quando agitado o gel ou mexido vigorosamente, ele se tornará fluido. Entretanto, após um tempo em repouso, o estado sólido retornará.

Há um intervalo entre o tempo de destruição e o reparo da estrutura tixotrópica. O intervalo pode ser uma questão de minutos ou talvez mais tempo, mas é possível criar uma série de sistemas em que o tempo de transformação é progressivamente mais curto que o próximo. No limite, parece que o tempo de transformação é quase instantâneo. Isto é, uma suspensão poderá parecer fluída enquanto estiver em movimento, mas apresentará certo grau de solidez depois que o movimento cessar (POWERS, 1968).

A tixotropia está relacionada à tensão cisalhante necessária para romper a estrutura do concreto fresco e passá-lo para fase fluida, quando o concreto for submetido ao processo de mistura.

Quanto maior for o intervalo de tempo decorrido do início da hidratação do cimento, ou seja, do início da adição de água à mistura, maior deverá ser o torque aplicado para promover a mesma tensão cisalhante no concreto. Esse fato é um poderoso artifício na dosagem de concretos que poderá influenciar na qualidade da sua microestrutura.

Castro (2007) demonstrou que concretos de composições iguais quanto à quantidade de agregados, consumo de cimento e relação água aglomerante, têm

comportamentos distintos quanto à tixotropia. Misturas com tais semelhanças apresentam diferenças quanto à perda de trabalhabilidade e tempo de endurecimento.

Essas diferenças foram atribuídas às diferentes seqüências de mistura dos materiais constituintes do concreto (figura 43) e podem favorecer os processos de hidratação e a qualidade da microestrutura do concreto.

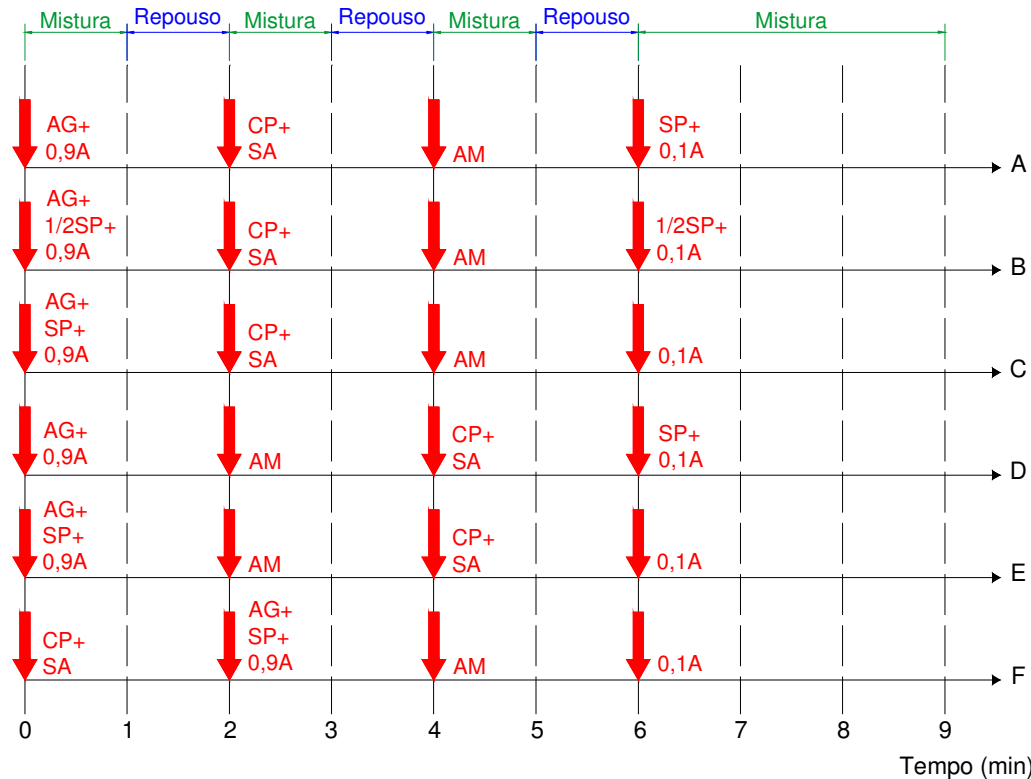


Figura 43. Diferentes procedimentos de mistura avaliados, onde AM=agregado miúdo, AG=agregado graúdo, CP=cimento, SA=sílica ativa, A=água e SP=superplastificante. Fonte: Castro (2007).

A figura 44 ilustra a relação entre o torque aplicado e a velocidade de rotação de um reômetro para fluidificar um micro concreto de alto desempenho (MCAD).

O torque aplicado está relacionado à tensão cisalhante que deve ser aplicada à mistura para provocar a sua deformação. Portanto, a velocidade de rotação pode ser relacionada à maior ou menor facilidade de deformar (cisalhar) a mistura.



A interpretação do ensaio representado pela figura 44 fornece dados apenas para uma análise qualitativa das misturas tixotrópicas – no caso em estudo – dos microconcretos de alto desempenho, cujos traços estão apresentados na tabela 9.

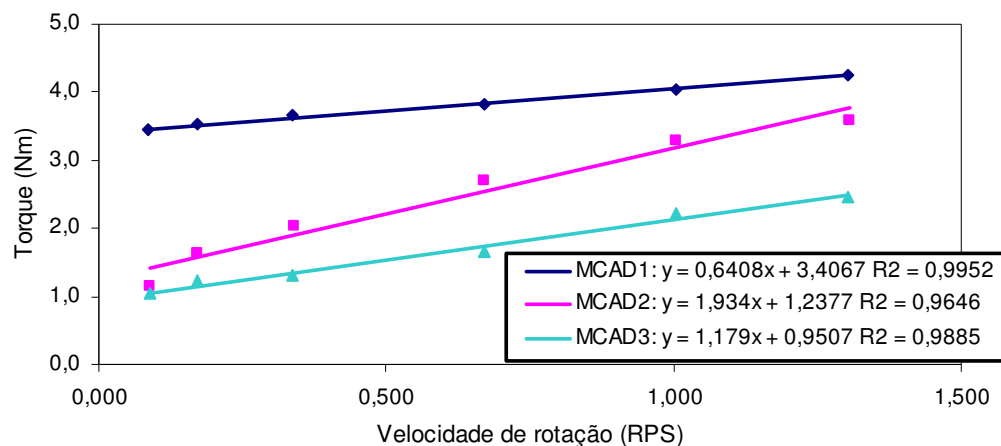


Figura 44. Curvas ascendentes de cisalhamento dos MCAD produzidos com CPV ARI Plus e com composição variada. Fonte: Castro (2007).

Tabela 9 – Traços dos microconcretos de alto desempenho (MCAD)

Misturas	Tipo de cimento	Traço (1:m)	a/agl (kg/kg)	Teor de sílica <sup>□</sup> (%)	Superplastificante (%)
<b>MICROCONCRETO (D<sub>máx</sub> □ 9,5 mm)</b>					
MCAD1		1:3,5	0,40	---	---
MCAD2	CPV ARI Plus	1:3,5 SP	0,40	---	0,61
MCAD3		1:3,5 SP	0,40	10	0,61

□ Sílica ativa adicionada em substituição volumétrica ao cimento.

Fonte: Castro (2007).

A tabela 10 apresenta a evolução da perda de trabalhabilidade ao longo do tempo dos microconcretos elaborados por Castro (2007), cujos traços estão na tabela 9. Esses resultados evidenciam a influência da reologia nas propriedades do concreto fresco e, por conseguinte, na evolução do processo de hidratação dos aglomerantes.

Tabela 10 – Resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone para os microconcretos de alto desempenho. Abatimentos em [mm].

Cimento	CPV ARI Plus					CPV ARI RS				
	Tempo de medida (min)					Tempo de medida (min)				
Microconcreto	10	30	60	90	120	10	30	60	90	120
MCAD1	20	-----	-----	-----	-----	20	-----	-----	-----	-----
MCAD2	240	190	130	60	30	230	190	125	80	50
MCAD3/A	190	135	80	60	15	210	165	135	100	55
MCAD3/B	175	125	100	50	0	195	155	130	105	80
MCAD3/C	190	165	110	55	10	180	145	110	90	65
MCAD3/D	210	175	120	75	45	200	145	115	65	40
MCAD3/E	225	190	130	70	50	190	140	120	75	35
MCAD3/F	205	150	90	50	15	175	140	120	90	55

Fonte: Castro (2007).

Em se tratando de concreto, cuja aplicação requer a incorporação de ar, os estudos reológicos também influenciam na estabilidade do sistema de ar, o qual pode ser afetado pela perda de abatimento antes de seu efetivo lançamento e adensamento. Tais procedimentos favorecem a expulsão das bolhas de ar devido à maior força cisalhante necessária para sua homogeneização.

Além da perda de abatimento, a quantidade de superplastificante também pode desestabilizar o sistema de ar, por conta da incorporação de bolhas de maiores diâmetros, as quais são instáveis (BOUZOUBAË et al., 2002; GAGNÉ, BOISVART, PIGEON, 1996). Portanto, os estudos reológicos do concreto no estado fresco podem colaborar com a potencialização dos superplastificantes nas dosagens, determinando o melhor instante para a sua adição, de modo a obter maior plasticidade e fluidez para o concreto.

#### 4 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

O programa experimental realizado nesta pesquisa teve como ponto de partida, a análise micro estrutural do concreto de alto desempenho para ambientes com baixas temperaturas, conforme projeto iniciado com Lima (2006).

Tal concreto apresentou desempenho até então não obtidos anteriormente por concretos submetidos ao congelamento. Ou seja, o CAD projetado por Lima (2006), resistiu aos mecanismos de geração de pressão hidráulica e difusão da água/gel e água capilar, não apresentou expansão suficiente para causar fissuração interna e alteração de suas propriedades mecânicas, apesar da relação  $a/agl$  de 0,42, relação de 1:m,  $m = 5$  e a não utilização de agente incorporador de ar, quando submetido à temperatura de até  $-35^{\circ}\text{C}$ <sup>18</sup>.

Por esse motivo, procedeu-se a investigação da microestrutura do concreto desenvolvido por Lima (2006) e com os dados assim obtidos partiu-se para a pesquisa de um novo concreto que resistisse ao congelamento e, também, aos ciclos de gelo/degelo.

Esse novo concreto vem complementar as necessidades relacionadas aos ambientes com baixas temperaturas, onde os sistemas de armazenagem, ou mesmo salas de processamento de produtos, são constantemente submetidos a ciclos de gelo/degelo, principalmente devido aos processos de sanitização industrial com água quente.

---

<sup>18</sup> A caracterização de todos os constituintes desse concreto está apresentada no anexo D.

Optou-se por caracterizar a microestrutura do CAD desenvolvido através de: imagens realizadas por microscopia eletrônica de varredura; por ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio; e por ensaios de absorção de água por imersão.

Outras técnicas de micro análises, como termogravimetria ou mesmo difratometria por raios-X, são muito interessantes para tais caracterizações; entretanto, outros pesquisadores do grupo do LMABC já realizaram tais ensaios, que puderam ser utilizados para a interpretação deste concreto, dentre eles: Melo (2000) e Silva (2000).

As seções seguintes apresentarão todos os passos do programa experimental, a saber:

- a. Determinação das características mecânicas do concreto: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade;
- b. Preparação das amostras para a realização das microanálises;
- c. Realização das microscopias eletrônicas de varredura em amostras do CAD Lima (2006);
- d. Realização do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio no CAD Lima (2006);
- e. Moldagem de corpos-de-prova para a realização dos ensaios de gelo e degelo;
- f. Caracterização mecânica do concreto exposto aos ciclos de gelo e degelo;
- g. Análise dos resultados do ensaio de gelo e degelo;
- h. Realização de porosimetria por intrusão de mercúrio em amostras dos concretos submetidos ao gelo e degelo;
- i. Dosagem do CAD para gelo/degelo;
- j. Realização de porosimetria por intrusão de mercúrio e microscopia eletrônica de varredura em amostras do novo CAD para gelo e degelo;
- k. Ensaio de absorção de água por imersão (NBR 9778:1987).

#### 4.1 Preparação das amostras para análises microscópicas

Detwiler *et al.* (2001) alertam que técnicas de preparação impróprias para amostras de concreto a serem analisadas por microscopia óptica ou eletrônica por varredura podem perturbar as amostras, levando à resultados pouco confiáveis.

A técnica utilizada nesta pesquisa baseou-se no método desenvolvido pelos Profs. Drs. Jefferson B. L. Liborio, coordenador do LMABC, e Aluísio Braz de Melo em 1998 – 2002. Ambos os pesquisadores montaram uma sala de preparação de amostras no LMABC (figura 45).



Figura 45. Vista da sala de preparação de amostras do LMABC

Esse método de preparação de amostras foi comprovado pelos diversos trabalhos subsequentes ao de Melo (2000) e que produziram resultados coerentes com os materiais ensaiados.

A primeira etapa para preparação das amostras consiste na sua extração de um corpo-de-prova ou um testemunho do concreto a ser analisado. Nessa fase, é imprescindível que se utilizem ferramentas que não alterem a natureza da amostra.

As amostras fraturadas de concreto para realização de microscopias eletrônicas de varredura e para serem submetidas a ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio devem ter no máximo 1 cm x 1 cm x 1cm de dimensão.

A recomendação para tais dimensões tem justificativa baseada na facilidade para sua dessecação, além de incorrerem em erros menores relativos aos fatores de correção utilizados na interpretação do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (COOK; HOVER, 1993).

Entretanto, o corte dessas amostras deve acontecer em duas etapas. Na primeira etapa devem ser retiradas amostras com dimensões maiores, obtidas a partir de máquinas de serra portátil, tipo Makita® ou outras similares e, a menor dimensão da amostra deve ficar em torno de 3 cm. O corte final deve ser realizado por máquina com discos com cortes diamantados, sempre umedecido com álcool isopropílico e com controle do esforço cortante sobre a amostra (figura 46).

As amostras, a partir das quais serão obtidas microscopias eletrônicas de varredura, poderão ser do tipo fraturada, de modo a apresentarem as reais características principalmente em relação às interfaces e as diferenças entre as diversas fases a serem investigadas.

Portanto, após o corte de amostras com dimensões aproximadas das especificadas, promove-se a fratura das mesmas com auxílio de ferramentas cortantes manuais, como exemplificados na figura 46.

A partir dessa fase não se deve mais ter contato manual direto com as amostras passando a se adotar o manuseio com a utilização de pinças.

Já as amostras que serão submetidas aos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio deverão ter todas as faces serradas pelo disco diamantado (figura 46).

Diamond (2004) recomenda que as amostras sejam polidas e cobertas com resina epoxídica, em se tratando de pesquisas que procuram identificar o grau de hidratação e a morfologia dos produtos de hidratação do cimento Portland por meio de ensaios de microscopia eletrônica de varredura.

Com as amostras serradas, fraturadas ou não, o passo seguinte é a limpeza e interrupção da hidratação e também a dessecação da amostra.

A limpeza para remoção de partículas soltas das amostras e outras possíveis sujidades oriundas do processo de corte e fraturação é promovida com a utilização de um equipamento de ultra-som.



(a) Primeiro corte das amostras



(b) Equipamento para corte



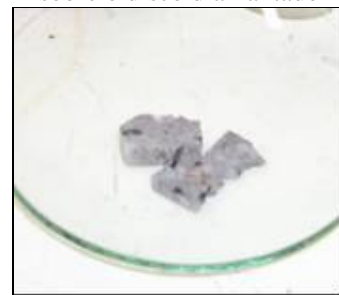
(c) Disco de corte diamantado e suporte de amostra



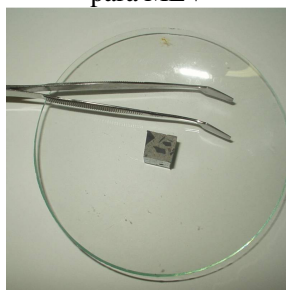
(e) Alavanca para controle do peso da amostra sobre o disco diamantado



(f) preparação da superfície fraturada – amostra para MEV



(g) amostras fraturadas



(h) Amostras para porosimetria por intrusão de mercúrio – serrada em todas as faces .

Figura 46. Preparação de amostras para microanálise – corte.

As amostras são imersas em álcool isopropílico, dentro de um recipiente, que em seguida, é acondicionado no aparelho de ultra-som. Esse conjunto ficará submetido às ondas do ultra-som por 15 minutos (figura 47).

Além de remover sujidades, já nessa fase se inicia a interrupção da hidratação do concreto.



(a) Aparelho ultra-som



(b) Amostras submetidas às ondas ultra-sônicas

Figura 47. Preparação de amostras – remoção de sujidades – ultra-som.

A próxima etapa da preparação, para interromper a hidratação e dessecar a amostra, é fazer uma seqüência de vácuo e agitação em álcool isopropílico.

Essa seqüência consiste em, primeiramente, submeter as amostras a 5 minutos de vácuo a uma pressão de 60 mm Hg e, em seguida, por 15 minutos de agitação magnética, à temperatura ambiente, com a amostra imersa em álcool isopropílico. Esse procedimento deve ser repetido três vezes, terminando o período com a amostra submetida ao vácuo. Com isso, a amostra passará quatro vezes pelo equipamento de vácuo e três vezes pelo agitador magnético (figura 48).

A interrupção da hidratação da amostra é necessária para que se possa caracterizar o material de acordo com a idade desejada. É possível realizar a preparação de amostras com diferentes idades de hidratação a partir de um mesmo corpo-de-prova.

Já a dessecação é importante, pois, tanto os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio quanto a obtenção das micrografias são feitos em câmara de vácuo com



equipamentos extremamente sensíveis, que podem ser danificados com a evaporação da água capilar<sup>19</sup>.



(a) equipamento para aplicação do vácuo



(b) Manuseio das amostras na câmara de vácuo



(c) Agitador magnético



(d) Amostras sob agitação magnética

Figura 48. Preparação de amostras – interrupção da hidratação e dessecação da amostra.

A última etapa dessa preparação de amostras consiste em deixá-las numa estufa a 60° C por 24 horas antes de realizar os ensaios microscópicos.

A temperatura da estufa não deve ultrapassar os 60° C, a fim de se evitar qualquer dano à microestrutura do concreto.

Há que se tomar cuidados especiais quanto à limpeza da estufa, sendo recomendáveis estufas em aço inoxidável para esse procedimento (figura 49).

Após todos os procedimentos ora descritos, as amostras deverão ser devidamente acondicionadas em sacos plásticos totalmente secos e esterilizados, lacrados e guardadas em local fresco, protegidos de luz solar e umidade, preferencialmente em recipientes do tipo dessecadores (figura 50).

<sup>19</sup> A dessecação de amostras pode ser dispensada em se tratando do uso de microscópio eletrônico de varredura com baixas temperaturas dotados de câmaras ambientadas em temperaturas criogênicas (CORR et al., 2004).



Figura 49. Preparação de amostras – secagem em estufa.



Figura 50. Armazenamento das amostras

#### 4.2 Ensaios de gelo e degelo em concreto

O procedimento para a realização de ensaios para a verificação da durabilidade de concretos submetidos a ciclos de gelo/degelo é estabelecido pela ASTM C666-92 *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*.

A ASTM C 666-92 recomenda a duração dos períodos de congelamento e descongelamento dos corpos-de-prova, à temperatura alvo, bem como a taxa de resfriamento. Além dessas instruções, essa norma descreve a maneira correta de acondicionar os corpos- de - prova em cada uma das fases.

A temperatura alvo, mínima recomendada pela ASTM C 666/92, é de  $-17,8^{\circ}\text{C}$  e a máxima de  $4,4^{\circ}\text{C}$ . O tempo de cada ciclo é de aproximadamente 5 horas, num total de 300 ciclos.

Para a validade do ensaio no caso em estudo – concretos para construção de sistemas de armazenagem sob baixas temperaturas – os parâmetros utilizados para a realização do ensaio foram:

1. Temperatura alvo mínima: - 35°C;
2. Temperatura alvo máxima: 22° C;
3. Duração dos ciclos: 48 horas;
4. Número de ciclos: 32.

A duração e o número de ciclos foram adotados de maneira que os corpos-de-prova permanecessem cerca de 1500 horas sob ciclos de gelo e degelo, o que equivale ao total de horas proposta pela ASTM C 666-92. Outros pesquisadores também adequaram estes dados de acordo com as necessidades e condições para realização do ensaio, tendo sido observado, por esta pesquisadora, que em tais estudos era mantido o total de 1500 horas de ensaio. Dentre essas pesquisas, cita-se o de Okamoto e Uomoto (1998), que adotaram 50 ciclos de 30 horas para ensaiar concretos de barragens submetidos a ciclos de gelo e degelo.

O desempenho dos concretos é avaliado pelo fator de durabilidade (FD), proposto pela ASTM C666-92. Em sua normativa, os concretos são considerados duráveis se o fator de durabilidade, ao final dos ciclos, for maior ou igual a 80%. A ruptura dos corpos-de-prova é constatada ao se atingir 60% do valor da frequência natural inicial.

O fator de durabilidade (FD) é calculado a partir do módulo dinâmico relativo dos corpos-de-prova como segue (equação 22) :

$$D_c = \left( n_1^2 / n^2 \right) \times 100 \quad (22)$$

Onde:

D = módulo de elasticidade dinâmico relativo, após C ciclos de gelo/degelo, em porcentagem;

$C$  = número de ciclos de gelo/degelo a que os corpos-de-prova foram submetidos;

$n$  = frequência natural transversal do corpo-de-prova antes do ensaio de gelo/degelo;

$n_I$  = frequência natural transversal do corpo-de-prova após  $C$  ciclos de gelo/degelo;

Com estes dados calcula-se o fator de durabilidade como segue ( equação 23):

$$FD = (D \times N) / M \quad (23)$$

Onde:

$FD$  = fator de durabilidade para o corpo-de-prova ensaiado a gelo/degelo;

$D$  = módulo de elasticidade dinâmico relativo para  $N$  ciclos de gelo e degelo;

$N$  = número de ciclos de gelo/degelo para o qual o corpo-de-prova apresentou o menor módulo de elasticidade dinâmico relativo;

$M$  = número total de ciclos de gelo/degelo propostos para a realização do ensaio completo.

O primeiro ensaio de gelo/degelo foi realizado para os dois concretos desenvolvidos por Lima (2006), ou seja, concretos com e sem ar incorporado.

Foram moldados corpos-de-prova prismáticos com seção transversal de 10 cm x 10 cm e comprimento de 50 cm.

Os corpos-de-prova foram moldados e curados em câmara úmida por 28 dias. Os equipamentos utilizados no ensaio de gelo/degelo (figura 51) foram:

1. Uma câmara-fria;
2. Uma caixa d'água em fibra de vidro;
3. Um acelerômetro piezoelétrico;
4. Um sistema de aquisição de dados Vishay sistema 6000.



(a) Equipamentos para ensaio de gelo/degelo



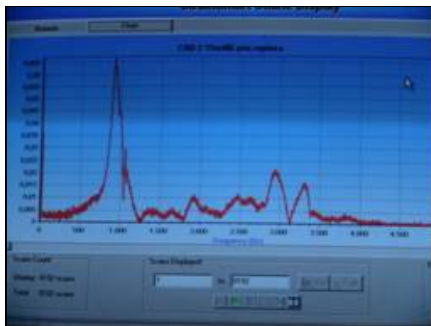
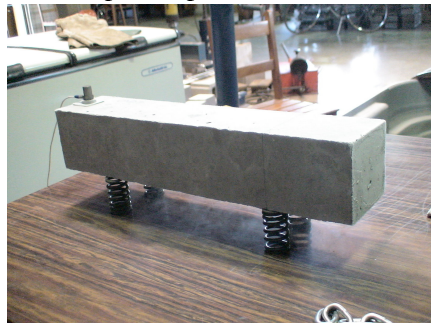
(b) Sistema de aquisição de dados



(c) Corpos-de-prova na câmara fria



(d) Detalhe do acelerômetro



(e) Saída de dados – gráfico da frequência x amplitude



(e) Caixa para degelo com água com cal

Figura 51. Ensaio de gelo/degelo

O ensaio consistiu em acondicionar os corpos-de-prova na câmara fria por 24 horas.

Após este período, eram lidas as medidas de frequência natural para então submergi-los em água com cal na caixa de degelo, por um período de 24 horas, perfazendo, assim, o ciclo de 48 horas. O término do ciclo é considerado na saída dos corpos-de-prova da caixa de água. Ao final de cada ciclo, foram feitas as leituras da frequência natural dos corpos-de-prova. A figura 51 ilustra o procedimento do ensaio de gelo/degelo.

Os corpos-de-prova foram acondicionados tanto na caixa de degelo como na câmara fria de modo que ficassem com a maior parte da superfície em contato com o ar frio ou a água. Para melhorar o contato entre a base do acelerômetro e o corpo-de-prova foram fixadas placas metálicas de alumínio.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados das análises mecânicas e microscópicas para os dois tipos de concretos estudados: concreto resistente ao congelamento e concreto resistente ao gelo e degelo.

### 5.1 CAD Lima (2006) – resistente ao congelamento

#### 5.1.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade

Reproduzindo-se o traço do concreto desenvolvido no mestrado desta autora, foram obtidos os resultados de resistência à compressão, expressos na tabela 11 para as idades de 1 dia, 7 dias e 28 dias.

Tabela 11 – Resistência à compressão simples característica para os concretos a serem submetidos a ciclos de gelo/degelo.

<b>Resistência à compressão simples (MPa)</b>			
<b>Traço</b>	<b>f<sub>ck1</sub></b>	<b>f<sub>ck7</sub></b>	<b>f<sub>ck28</sub></b>
1:5 (s/IAR)	15	40	55
1:5 (c/6±1% IAR*)	8	26	41
Consistência 100±10mm IAR – ar incorporado			

O módulo de elasticidade secante para o concreto sem ar incorporado foi de 43 GPa e para o concreto com ar incorporado foi de 41 GPa.

#### 5.1.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para proceder à investigação da microestrutura do CAD resistente ao congelamento (i.e. sem ar incorporado), procedeu-se, após a preparação das amostras, a realização de microscopias eletrônicas de varredura (figura 52), com o objetivo de, principalmente, verificar suas características em relação às interfaces; e também de verificar a sua sanidade.

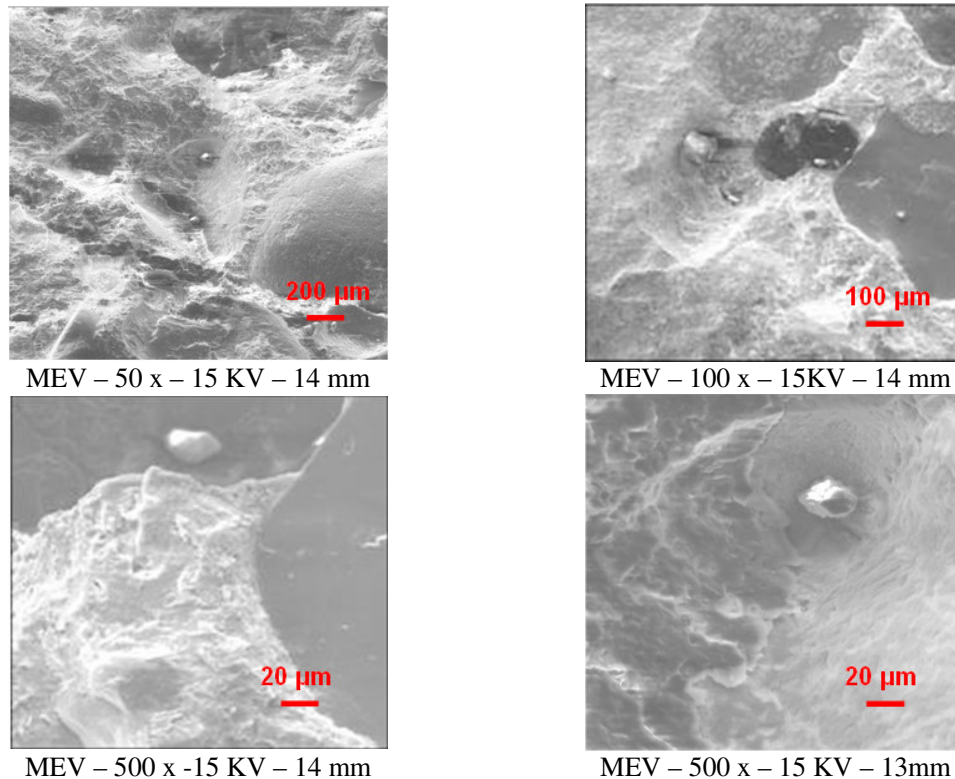


Figura 52. Microscopias eletrônicas de varredura para CAD de Lima (2006).

As amostras submetidas a essa análise foram extraídas dos corpos-de-prova que já haviam passado pelo período de 35 dias expostos ao congelamento sob a temperatura de  $-35^{\circ}$  C. Dessa maneira pôde-se comprovar a integridade da microestrutura, e a eficiência dos ensaios dinâmicos em monitorar a fissuração interna causada pelos mecanismos de deterioração do concreto, quando submetido ao congelamento.



As imagens da figura 46 foram obtidas a partir de microscopia eletrônica de varredura, realizadas em microscópio ZEIS cuja precisão é de 45 nm. Todas elas puderam atestar a integridade do material.

O que se pôde observar foi a elevada densidade e homogeneidade da matriz da pasta de cimento envolvendo os agregados, sem distinção na região da interface. Nenhuma fissura foi observada.

### **5.1.3 Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)**

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio realizado em uma amostra, cujo corpo-de-prova já havia sido submetido ao congelamento e sem ar incorporado, comprovou a sua densa matriz da pasta de cimento. A porosidade aferida foi de 1,57% .

Os resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio estão pormenorizados na tabela 12 e o gráfico da figura 53 relaciona o diâmetro médio dos poros do CAD com o volume acumulado de mercúrio inserido na amostra durante o ensaio. A análise desse gráfico permite a observação da variação dos diâmetros dos poros deste concreto, permitindo-se afirmar que a maioria está compreendida entre  $0,006 \leq \Phi \leq 0,06$ .

O tamanho crítico do poro é de 0,0065  $\mu\text{m}$  e a porosidade total da amostra é de 1,57%.

O ensaio de porosimetria também teve a sua importância na confirmação da massa específica do CAD. Em estado fresco, a densidade obtida para o CAD foi de 2,46 g/cm<sup>3</sup> e o teor de ar, determinado pelo método gravimétrico, foi de 2,24%. Com o endurecimento do concreto e avanço da hidratação houve aumento da densidade de 2,46 g/cm<sup>3</sup> para 2,48 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 12 - Dados da porosimetria por intrusão de mercúrio da amostra de CAD resistente ao congelamento.

<b>Dados do ensaio de porosimetria</b>	
Volume total de mercúrio utilizado no ensaio	0,0063ml/g
Área total de poro	1,197 m <sup>2</sup> /g
Diâmetro médio dos poros (volume)	0,0278 µm
Diâmetro médio dos poros (área)	0,0120 µm
Diâmetro médio dos poros (4V/A)	0,0211 µm
Massa específica	2,4844 g/cm <sup>3</sup>
Massa aparente	2,5240 g/cm <sup>3</sup>
Porosidade	1,57%

Fonte: Instituto de Física de São Carlos – EESC – USP

### CAD LIMA (2006)

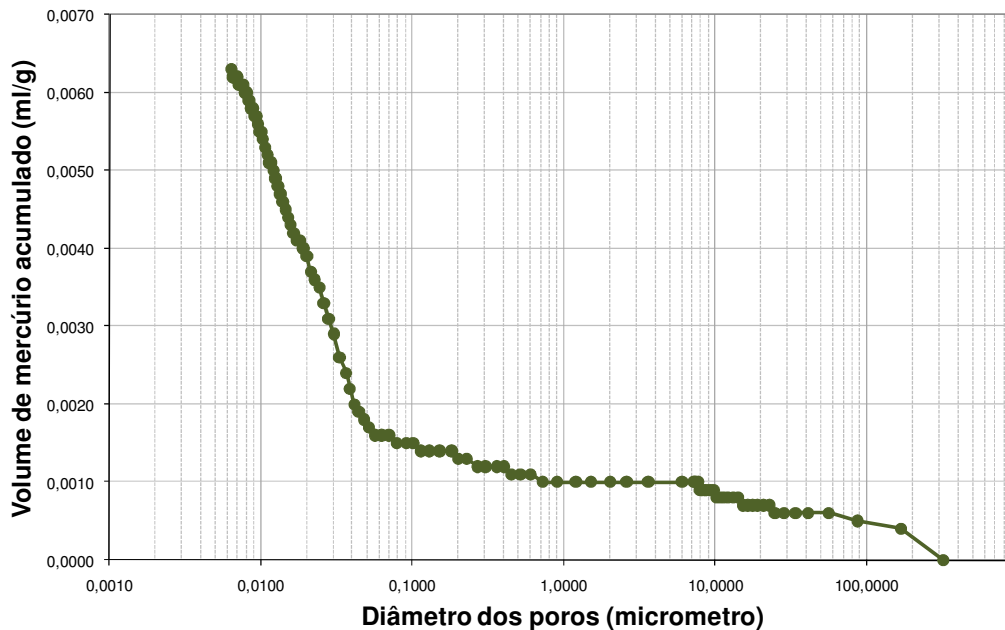


Figura 53. Representação gráfica do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio para o concreto elaborado por Lima (2006) resistente ao congelamento – diâmetro dos poros (µm) versus volume de mercúrio acumulado (ml/g).

O fator de espaçamento crítico, calculado segundo Attiogbe (1993), através da equação  $20^{\bar{s}}$  foi de 2,67 µm.

$$20^{\bar{s}} = 2 \frac{p^2}{\alpha A}$$

A expressão proposta por Attiogbe (1993) tem como variáveis a fração volumétrica de pasta no concreto ( $p$ ), o teor de ar ( $A$ ) e a área específica. O valor de “ $p$ ” foi determinado a partir do traço unitário do concreto, sendo de  $0,2922 \text{ m}^3$  de pasta por metro cúbico de concreto; o teor de ar de  $2,15\%$  foi determinado pelo método gravimétrico; o valor da área específica dos poros foi obtido pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, sendo calculado o valor da área específica para os poros em  $1 \text{ m}^3$  de concreto.

Em seguida apresenta-se a memória de cálculo para esses valores:

- i. Fração volumétrica de pasta no concreto:

Traço unitário:  $(1:a:p:a/agl) = (1:2,36:2,64:0,42)$ , considerando a substituição volumétrica de  $10\%$  de cimento por sílica ativa, a fração de aglomerante foi dividida em  $0,9$  para cimento Portland CP II E 32 e  $0,0711$  para a sílica ativa.

As massas específicas para os constituintes do concreto são:  $3,04 \text{ g/cm}^3$  para o cimento,  $2,16 \text{ g/cm}^3$  para a sílica,  $2,63 \text{ g/cm}^3$  para a areia,  $2,88 \text{ g/cm}^3$  para a brita e  $1,00 \text{ g/cm}^3$  para a água.

Com esses valores calcula-se a fração “ $p$ ”:

$$p = \frac{\frac{0,9}{3,04} + \frac{0,0711}{2,16} + \frac{0,42}{1}}{\frac{0,9}{3,04} + \frac{0,0711}{2,16} + \frac{2,36}{2,63} + \frac{2,64}{2,88} + \frac{0,42}{1}} = 0,2922 \text{ m}^3 / \text{m}^3$$

- i. Área específica dos poros em  $1 \text{ m}^3$  de concreto:

A área específica total de poros para  $1,00 \text{ m}^3$  foi obtida multiplicando-se a área total dos poros ( $1,197 \text{ m}^2/\text{g}$ ) pela massa em gramas em  $1,00 \text{ m}^3$  ( $2.484.000,00 \text{ g}$ ) resultando em  $2.973.348 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .

- ii. Cálculo do espaçamento crítico  $\bar{s}$ :

$$\bar{s} = 2 * \left( \frac{0,2922^2}{2973348 * 0,0215} \right) = 2,67 \times 10^{-6} m = 2,67 \mu m$$

#### 5.1.4 Ensaio de gelo e degelo

As frequências naturais medidas inicialmente para os corpos-de-prova estão na tabela 13.

Tabela 13 - Frequência natural para os corpos-de-prova de concretos com e sem ar incorporado submetidos ao gelo/degelo.

<b>Frequência Natural</b>			
<b>Concreto sem ar incorporado</b>		<b>Concreto com ar incorporado</b>	
Ref.	1586	Ref.	1421
CAD1	1537	CAD1	1497
CAD2	1564	CAD2	1433
CAD3	1576	CAD3	1459

Nas tabelas 14 e 15 estão apresentados os resultados do ensaio de gelo/degelo para o primeiro ciclo, o 16º ciclo, correspondente a 50% do número de ciclos a serem realizados, o último ciclo e os ciclos nos quais os corpos-de-prova sem ar incorporado romperam.

Os resultados para todos os 32 ciclos estão detalhados no anexo D.

Nessas tabelas 14 e 15 estão apresentados ainda, os valores para o módulo de elasticidade dinâmico relativo ( $D_c$ ) e o fator de durabilidade (FD), calculados segundo a ASTM C 666-92.

O fator de durabilidade é função do número total de ciclos. Esse fato explica o motivo pelo qual, no primeiro ciclo, o fator de durabilidade é tão baixo, mesmo não havendo alteração no valor da frequência natural. Teoricamente, para um concreto com 100% de estabilidade frente a ciclos de gelo/degelo, o fator de durabilidade é

exatamente igual a porcentagem de ciclos realizados. Por exemplo, para 20% dos ciclos realizados (i.e. para o caso deste estudo corresponderia a cerca de 6 ciclos) o fator de durabilidade seria de 20%.

Quando o fator de durabilidade for maior que 100%, significa que houve um aumento da frequência natural dos corpos-de-prova durante o ensaio de gelo e degelo.

Para os corpos-de-prova de referência não foram calculados os módulos relativos de elasticidade dinâmica e os fatores de durabilidade, uma vez que não foram submetidos aos ciclos de gelo/degelo, pois permaneceram sempre em temperatura ambiente.

Tabela 14 – Ensaio de gelo e degelo para concreto resistente ao congelamento – Concreto sem ar incorporado - CAD Lima (2006).

Ensaio de gelo e degelo – 31/07/2006 a 03/10/2006					
Nº de ciclos	Corpo-de-prova	Frequência Natural (hz)		Dc (%)	FD (%)
		Gelo	Degelo		
1	REF	1607	1594		
	CAD1	1560	1572	105	3
	CAD2	1580	1602	105	3
	CAD3	1593	1605	104	3
13	REF	1528	1524		
	CAD1	1661	915	35	14
	CAD2	1713	1334	73	30
	CAD3	1714	1074	46	19
16	REF	1534	1535		
	CAD1				
	CAD2	1712	1084	48	24
	CAD3	1690	895	32	16
17	REF		1540		
	CAD1				
	CAD2		962	38	20
	CAD3				
18	REF		1530		
	CAD1				
	CAD2		902	33	19
	CAD3				

Tabela 15 – Ensaio de gelo e degelo para concreto resistente ao congelamento – Concreto com ar incorporado - CAD Lima (2006).

Ensaio de gelo e degelo – 31/07/2006 a 03/10/2006					
Nº de ciclos	Corpo-de-prova	Frequência Natural (hz)		Dc (%)	FD (%)
		Gelo	Degelo		
1	REF	1426	1432		
	CAD1	1486	1486	99	3
	CAD2	1429	1451	103	3
	CAD3	1468	1484	103	3
16	REF	1367	1370		
	CAD1	15272	1471	97	48
	CAD2	1520	1434	100	50
	CAD3	1587	1471	102	51
32	REF	1364	1365		
	CAD1	1581	1474	97	97
	CAD2	1536	1435	100	100
	CAD3	1595	1480	103	103

A tabela 16 apresenta os valores da frequência natural para os corpos-de-prova após 24 horas do término da realização do ensaio de gelo/degelo, ou seja, após estarem em equilíbrio termodinâmico com o ambiente.

Tabela 16 - Frequência natural após o ensaio de gelo/degelo – equilíbrio termodinâmico com o ambiente.

<b>Frequência Natural Final após secagem (Hz)</b>			
<b>Concreto sem ar incorporado</b>		<b>Concreto com ar incorporado</b>	
Ref.	1528	Ref.	1364
CAD1	956	CAD1	1372
CAD2	915	CAD2	1355
CAD3	994	CAD3	1380

No decorrer do ensaio de gelo/degelo foram feitas algumas observações a respeito da variação das frequências naturais dos corpos-de-prova de referência, que permaneceram em temperatura ambiente. As figuras 54 a 57 ilustram a variação das

freqüências para os concretos com e sem ar incorporado, e apresenta as variações de umidade e temperatura ambiente para o período correspondente às leituras das freqüências naturais.

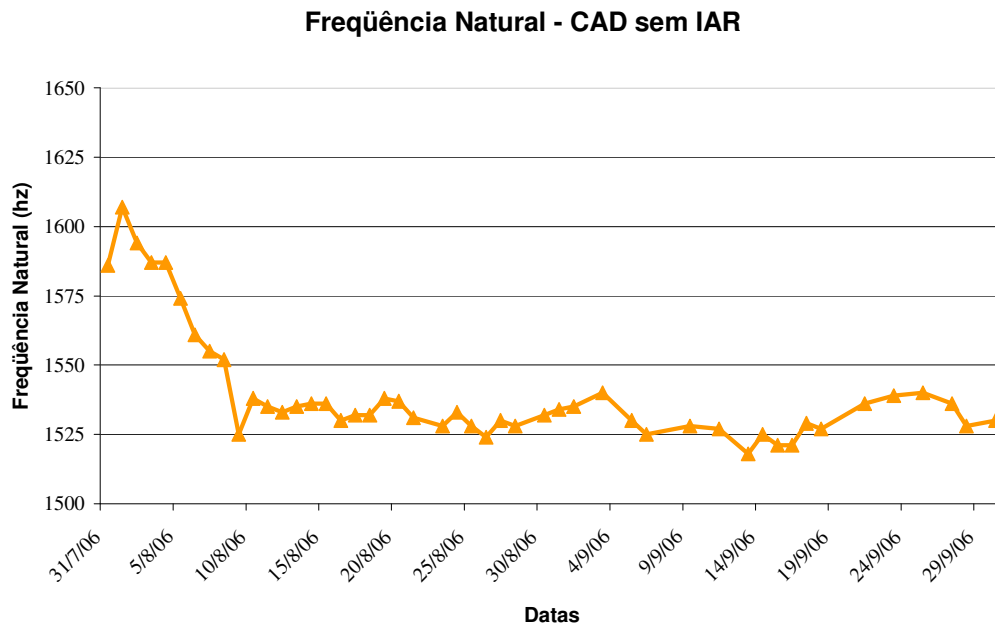


Figura 54. Variação da freqüência natural para o corpo-de-prova de referência do concreto sem ar incorporado.

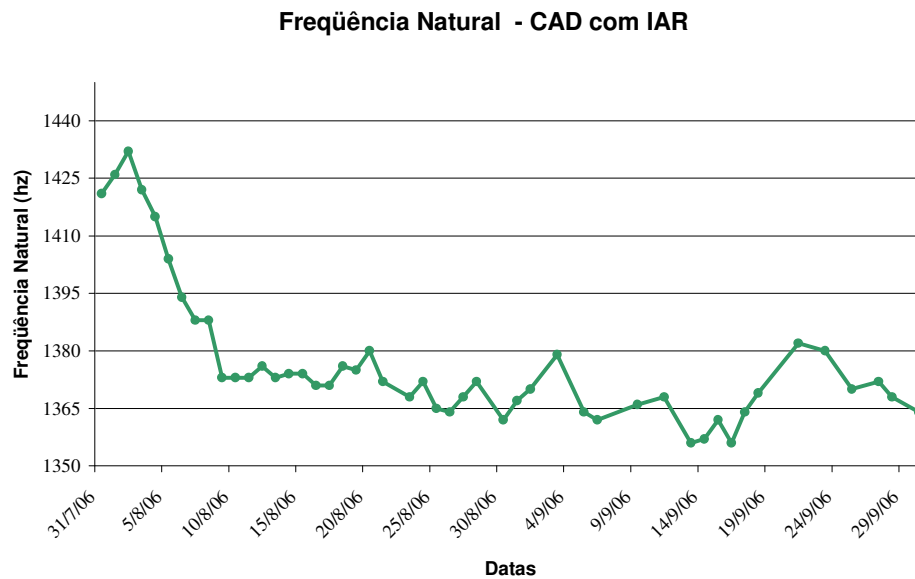


Figura 55. Variação da freqüência natural para o corpo-de-prova de referência do concreto com ar incorporado.



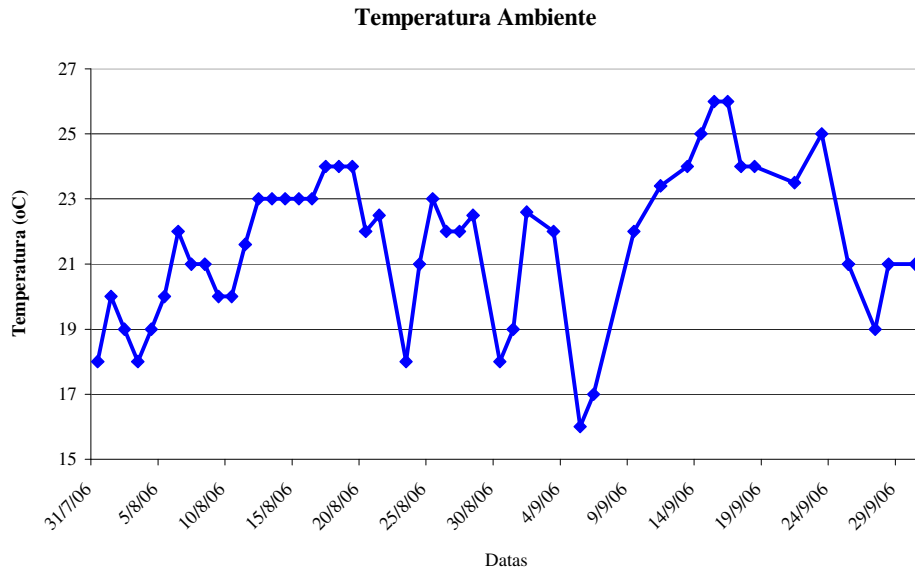


Figura 56. Variação da temperatura ambiente para os corpos-de-prova de referência.

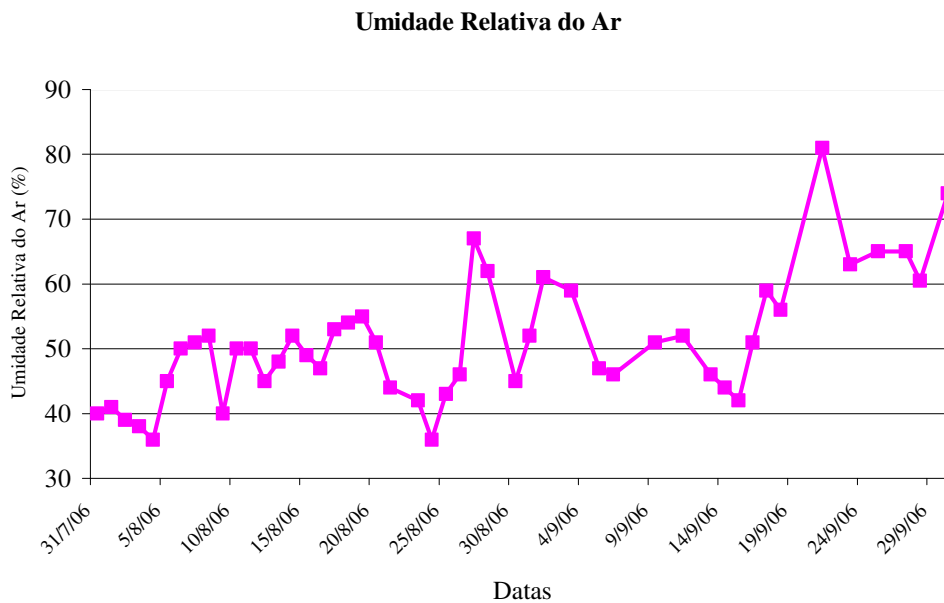


Figura 57. Variação da umidade relativa do ar para os corpos-de-prova de referência.

As figuras 54 e 55 apresentam a variação da frequência natural dos corpos-de-prova de concreto com e sem ar incorporado. Para ambos os concretos houve uma queda da frequência natural nos dez primeiros dias de ensaio, sendo que a partir desta

data os valores das frequências variam muito pouco, em torno de 1% do valor estabilizado.

Os valores máximos ocorreram para os maiores valores de umidade relativa do ar, assim como os menores valores de frequência natural corresponderam aos menores valores da umidade relativa do ar, com exceção para o início, pois os corpos-de-prova após 28 dias de cura ficaram 30 dias armazenados em sala fechada. Isso explica a queda inicial dos primeiros dez dias da frequência atribuída ao fenômeno da retração por secagem. O mesmo fenômeno também explica a ocorrência dos máximos valores para os maiores índices de umidade relativa do ar.

Não se pode observar nenhuma correlação entre a temperatura e a variação da frequência natural dos corpos-de-prova.

Os resultados do primeiro ensaio dos concretos com e sem ar incorporado mostraram que o concreto sem ar incorporado não foi durável frente a ciclos de gelo/degelo, apresentando um fator de durabilidade em torno de 33%. Já o concreto com ar incorporado resistiu aos ciclos, apresentando fator de durabilidade mínimo de 97%.

### **5.1.5 Análise microscópica após o ensaio de gelo e degelo**

Com a ruptura dos corpos-de-prova de concreto sem ar incorporado, durante o ensaio de gelo e degelo, e almejando determinar a quantidade ideal de ar incorporado no concreto – de tal forma a evitar a sua ruptura nesta condição – optou-se pela realização de um novo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, em uma amostra de concreto rompida.

Esse ensaio mostrará o aumento da porosidade do concreto após sua exposição aos ciclos de gelo e degelo. A diferença entre ambas será a expansão causada pela ação

do gelo e degelo, sendo este valor adotado como fração ideal de ar a ser incorporado no concreto para torná-lo durável à ação do gelo e degelo.

Vale ressaltar que o concreto com  $6\pm 1\%$  de ar incorporado foi durável aos ciclos de gelo e degelo. Entretanto, tal concreto tem grande perda de resistência mecânica, tornando-se inadequado para o uso proposto.

A porosimetria por intrusão de mercúrio da amostra danificada apresentou os resultados da tabela 17.

Tabela 17 - Dados da porosimetria por intrusão de mercúrio da amostra danificada de concreto submetido aos ciclos de gelo e degelo.

<b>Dados do ensaio de porosimetria</b>	
Volume total de mercúrio utilizado no ensaio	0,0182/g
Área total de poro	3,806 m <sup>2</sup> /g
Diâmetro médio dos poros (volume)	0,0267 µm
Diâmetro médio dos poros (área)	0,0108 µm
Diâmetro médio dos poros (4V/A)	0,0192 µm
Massa específica	2,3145 g/cm <sup>3</sup>
Massa aparente	2,4164 g/cm <sup>3</sup>
Porosidade	4,22 %

Os dados deste ensaio de porosimetria, comparados aos dados da porosimetria realizada na amostra de concreto antes dos ciclos de gelo/degelo, permitiram as seguintes observações:

1. A expansão causada pela ação dos ciclos de gelo/ degelo sobre o concreto aumentaram a sua porosidade de 1,57% para 4,22%;
2. Estes mecanismos de deterioração também causaram a redução da massa específica do concreto de 2,48 g/cm<sup>3</sup> para 2,31 g/cm<sup>3</sup>;

A partir desses dados, optou-se pela elaboração de um novo concreto, cujo teor de ar incorporado foi de 3,5%.

## **5.2 Concreto resistente ao gelo e degelo**

### 5.2.1 Definição do traço

O traço de concreto utilizado foi o mesmo proposto por Lima (2006). Dois objetivos governaram o projeto desta nova dosagem: a diminuição ao máximo da quantidade de ar incorporado e o reforço da matriz da pasta de cimento.

Partiu-se, então, para uma nova dosagem de concreto baseada nas observações decorrentes do primeiro ensaio de gelo e degelo. Para essa nova moldagem, também se adotou a prática da revibração com o intuito de tornar mais densa e, portanto, mais resistente a microestrutura do concreto.

No concreto com ar incorporado desenvolvido por Lima (2006), notou-se uma melhoria significativa da trabalhabilidade em relação ao concreto sem ar incorporado. Esta diferença possibilitaria que o concreto com ar incorporado tivesse reduzido o seu teor de argamassa e até mesmo a quantidade de água de amassamento. Entretanto, na ocasião daquela pesquisa de mestrado, optou-se por manter os mesmos parâmetros de dosagem para os dois traços (i.e. concreto com e sem ar incorporado), a fim de ter bases de comparação.

Para esta nova dosagem, reduziu-se o teor de argamassa de 56% para 53% e a relação água/aglomerante de 0,42 para 0,41. O cimento utilizado foi o mesmo – CP II 32 E – com 10% de sílica ativa em substituição volumétrica. A tabela 18 apresenta o traço do concreto a ser submetido aos novos ciclos de gelo e degelo.

Tabela 18 – Concreto para ciclos de gelo/degelo - parâmetros de dosagem.

<b>Concretos submetidos a ciclos de gelo/degelo</b>	
Parâmetros de Dosagem	
1:M	1:5
1:a:p:a/agl	1:2,18:2,82:0,41
% S.P.	0,35
% IAR*	0,00925
Teor de ar incorporado (%)	3,5
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	384
Teor de argamassa (%)	53
Consistência (mm)	100±10

\* Aditivo incorporador de ar

O procedimento de colocação e mistura dos materiais na betoneira obedeceu a seguinte ordem:

1. Agregado graúdo e sílica ativa e 20% da água de amassamento com um tempo de mistura de 2 minutos;
2. Cimento, areia e 40% da água de amassamento com um tempo de mistura de 5 minutos;
3. Tempo de descanso na betoneira – 15 minutos;
4. Superplastificante e 35% da água de amassamento com um tempo de mistura de 3 minutos;
5. Aditivo incorporado de ar e 5% da água de amassamento com um tempo de mistura de 2 minutos.

O item 1 promove a dopagem dos agregados graúdos, o que confere mais resistência à zona de interface pasta/agregado. O tempo de descanso da mistura por 15 minutos após a adição e mistura do cimento é o que caracteriza a técnica da revibração.

### 5.2.2 Resistência mecânica

Os ensaios de resistência à compressão foram feitos de acordo com as recomendações da NBR 5739:1994<sup>21</sup>, sendo o valor característico calculado segundo a NBR 12655:2006<sup>22</sup> para amostragem total.

Na tabela 19 são apresentados os resultados dos ensaios à compressão simples para o novo traço de concreto.

Tabela 19 – Resistência à compressão simples para o novo traço de concreto a ser submetido aos ciclos de gelo/degelo.

<b>Resistência à compressão simples (MPa)</b>		
<b>Traço</b>	<b>f<sub>ck7</sub></b>	<b>f<sub>ck28</sub></b>
1:5 (3,5% IAR)	40	49
Consistência 100±10mm		

O módulo de elasticidade do novo concreto foi de 43 GPa.

### 5.2.3 Ensaio de gelo e degelo

O segundo ensaio de gelo/degelo para avaliar o desempenho do novo concreto seguiu as mesmas recomendações do primeiro ensaio, sendo também realizado em 32 ciclos, perfazendo o total de 1536 horas.

As frequências naturais dos corpos-de-prova do novo concreto, antes de serem submetidos ao ensaio de gelo e degelo, estão expressas na tabela 20. Para simplificar o modo de referência deste novo concreto adotou-se doravante a designação CAD N.

<sup>21</sup> NBR 5739: 1994 – Resistência à compressão de axial

<sup>22</sup> NBR 12655: 2006 Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento.

Tabela 20 - Frequências naturais dos corpos-de-prova de CAD N antes da realização do ensaio de gelo/degelo.

Frequência Natural Inicial (Hz)	
Concreto Novo – 3,5% de ar incorporado	
CAD N 1	1622
CAD N 2	1612
CAD N 3	1616
CAD N 4	1582
CAD N 5	1620

A tabela 21 contém resultados iniciais, intermediários e finais correspondentes aos ciclos de gelo/degelo, sendo os demais resultados apresentados no anexo D.

Ao final dos 32 ciclos de gelo/degelo o novo concreto teve ótimo desempenho frente a tal condição, apresentando fator de durabilidade mínimo de 96%.

Com este ensaio pode-se atribuir o alto desempenho ao concreto projetado nesta pesquisa frente a ciclos de gelo/degelo.

A tabela 22 apresenta os valores das frequências naturais para os corpos-de-prova do novo concreto após 48 horas do término do ciclo de gelo/degelo.

Apesar de o novo concreto resistir aos ciclos de gelo/degelo e apresentar resultados excelentes quanto ao módulo de elasticidade, massa específica do concreto endurecido e resistência à compressão, no primeiro ciclo de gelo/degelo a que foi submetido, observou-se uma fissuração na superfície do concreto (figura 58).

Tabela 21 - Resultados do ensaio de gelo/degelo para o novo concreto com 3,5% de ar incorporado.

<b>Ensaio de Gelo / Degelo - Novo Concreto -3,5% Ar Incorporado - 26/10/2006 a 29/12/2006</b>					
<i>Número de Ciclos (N)</i>		<i>Novo Concreto</i>		<i>Dc (%)</i>	<i>FD (%)</i>
		<i>Frequência Natural (hz)</i>			
		<i>Gelo</i>	<i>Degelo</i>		
1	CAD N1	1667	1600	97	3
	CAD N2	1655	1602	99	3
	CAD N3	1664	1609	99	3
	CAD N4	1630	1572	99	3
	CAD N5	1670	1616	100	3
16	CAD N1	1660	1614	99	50
	CAD N2	1663	1593	98	49
	CAD N3	1673	1602	98	49
	CAD N4	1640	1566	98	49
	CAD N5	1680	1614	99	50
32	CAD N1	1670	1592	96	96
	CAD N2	1656	1589	97	97
	CAD N3	1668	1598	98	98
	CAD N4	1655	1569	98	98
	CAD N5	1670	1612	99	99

Tabela 22 - Frequências naturais dos corpos-de-prova de CAD N após 48 horas do término do ensaio de gelo/degelo.

<b><i>Frequência Natural Final (Hz)</i></b>	
<i>Concreto Novo - 3,5% de ar incorporado</i>	
CAD N1	1557
CAD N2	1554
CAD N3	1563
CAD N4	1534
CAD N5	1580

Essa fissuração não avançou com o decorrer dos 32 ciclos restantes e também não provocou perda de massa dos corpos-de-prova.

Na primeira série de ensaio de gelo/degelo, os corpos-de-prova dos concretos com e sem ar incorporado desenvolvido por Lima (2006), não apresentaram essa patologia,



mesmo os corpos-de-prova sem ar incorporado que romperam ao atingirem 60% do valor inicial da frequência natural.

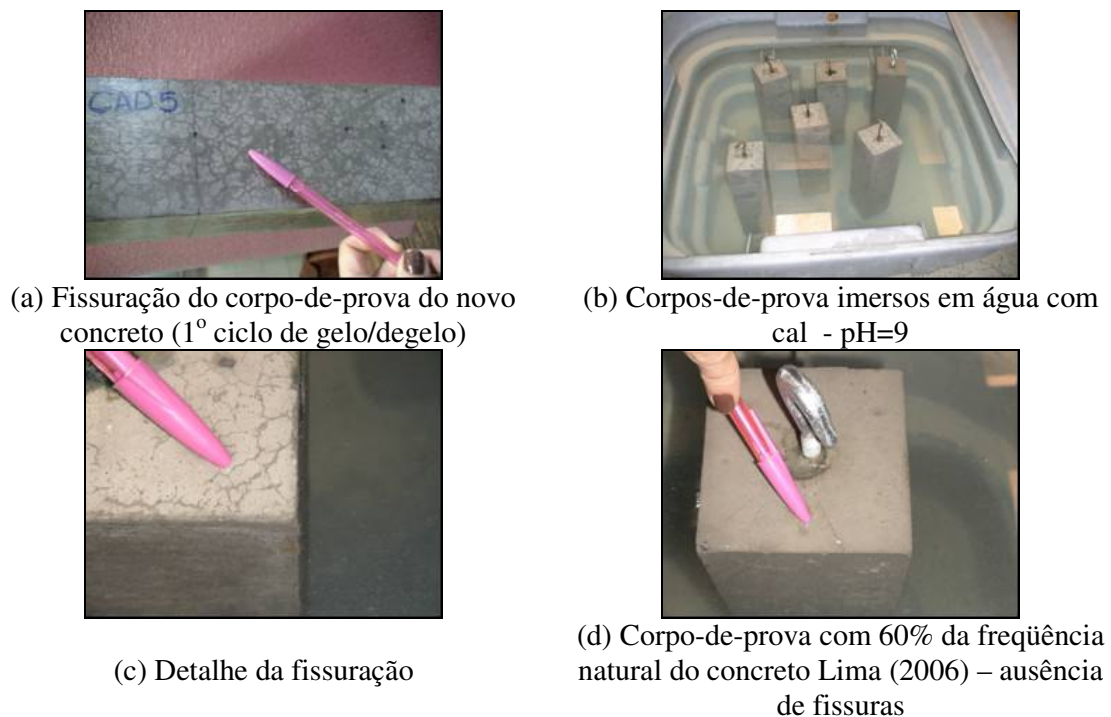


Figura 58. Fissuração da superfície dos corpos-de-prova submetidos ao gelo/degelo.

A investigação da causa dessas fissuras iniciou por analisar as diferenças entre os procedimentos de dosagem entre os dois concretos. As diferenças entre os dois processos de dosagem foram: a revibração e o processo de cura. Na primeira série não foi utilizada a técnica de revibração e a cura deu-se por 28 dias em câmara úmida. Na segunda série utilizou-se a técnica da revibração e a cura foi em água com cal por 28 dias, cujo ph medido pelo processo de colorimetria foi de 9.

Portanto, uma nova dosagem de concreto com as mesmas características da segunda (i.e. concreto com 3,5 % de ar incorporado) foi realizada, analisando-se as seguintes condições:

1. Revibração e cura em água com cal (RAC);
2. Revibração e cura em câmara úmida (RCU);

3. Sem revibração e cura em água com cal (VAC);
4. Sem revibração e cura em câmara úmida (VCU).

Foram feitos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade para os concretos dosados de acordo com os procedimentos ora referenciados. Os resultados estão expressos na tabela 23.

Tabela 23 – Resistência mecânica para os concretos dosados com e sem revibração e curados em água com cal e câmara úmida.

Concretos	Resistência à compressão (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)
	fck <sub>7</sub>	fck <sub>29</sub>	
RCU	43	50	43
RAC	43	53	44
VCU	42	50	42
VAC	42	51	44

Foram moldados 3 corpos-de-prova prismáticos para os concretos dosados com os diferentes procedimentos de mistura e cura. Tais corpos-de-prova foram submetidos aos ciclos de gelo e degelo, seguindo os mesmos critérios dos dois primeiros ensaios.

Todos os corpos-de-prova foram duráveis aos ciclos de gelo e degelo e, dessa vez, nenhum deles apresentou a fissuração no início ou no decorrer do ensaio.

A tabela 24 sumariza os resultados do ensaio de gelo e degelo para estes concretos.

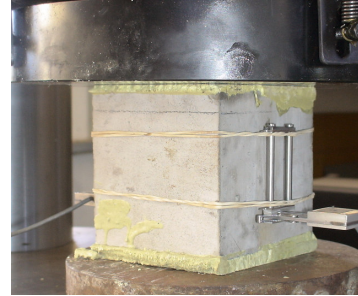
Observou-se que o tempo decorrido entre o final do período de 28 dias de cura e o início dos ciclos de gelo e degelo foram diferentes para as três séries de ensaios, sendo de 26 , 6, e 40 dias, respectivamente, para a primeira, a segunda (i.e. série em que houve a fissuração superficial dos corpos-de-prova) e a terceira série. Sendo assim, atribuiu-se a causa da fissuração aos diferentes graus de saturação da superfície dos corpos-de-prova no instante em que foram expostos aos ciclos de gelo e degelo.

Tabela 24 – Resultado do ensaio de gelo e degelo para os concretos dosados com e sem revibração e curados em água com cal e câmara úmida.

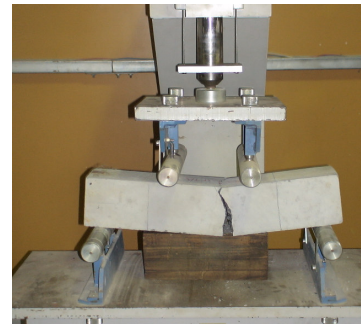
Concretos	Frequência Natural (hz)		FD (%)
	Inicial	Final	
VAC1	1535	1539	100
VAC2	1535	1535	101
RAC1	1526	1529	100
RAC2	1530	1533	100
VCU1	1504	1523	103
VCU2	1505	1539	105
RCU1	1517	1550	104
RCU2	1532	1553	103

Para averiguar a sanidade dos concretos após os ensaios de gelo e degelo, foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e o módulo de elasticidade nos corpos-de-prova prismáticos expostos aos ciclos de gelo e degelo da terceira série. Para o ensaio de resistência à compressão, foram extraídos corpos-de-prova cúbicos com 10 cm de aresta a partir dos corpos-de-prova prismáticos de 10 cm x 10 cm x 50 cm. A resistência à compressão foi de 55 MPa (i.e. equivalente a 47 MPa para corpos-de-prova cilíndricos); a resistência à tração na flexão foi de 4,7 MPa e o módulo de elasticidade foi de 41 GPa.

A figura 59 ilustra esses ensaios mecânicos.



a) Ensaio do módulo de elasticidade em corpo-de-prova cúbico.



b) Ensaio de resistência à tração na flexão em corpo-de-prova prismático

Figura 59. Ensaio de resistência mecânica em concretos com 3,5% de ar incorporado após a exposição aos ciclos de gelo e degelo: a) ensaio para obtenção do módulo de elasticidade em corpo-de-prova cúbico; b) ensaio de resistência à tração na flexão e, corpo-de-prova prismático.

#### 5.2.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio para as duas últimas séries de concretos submetidos ao gelo e degelo.

A tabela 25 e a figura 60 apresentam os dados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio para o novo concreto da segunda série de ensaios de gelo e degelo.

Tabela 25 - Dados da porosimetria por intrusão de mercúrio da amostra do novo concreto com 3,5% de ar incorporado.

<b>Dados do ensaio de porosimetria</b>	
Volume total de mercúrio utilizado no ensaio	0,0160/g
Área total de poro	3,536 m <sup>2</sup> /g
Diâmetro médio dos poros (volume)	0,0202 μm
Diâmetro médio dos poros (área)	0,0119 μm
Diâmetro médio dos poros (4V/A)	0,0181 μm
Massa específica	2,5359 g/cm <sup>3</sup>
Massa aparente	2,6428 g/cm <sup>3</sup>
Porosidade	4,05 %

Fonte: Instituto de Física de São Carlos – EESC – USP

### CAD 3,5% IAR - 2ª Série de Ensaio de Gelo e Degelo

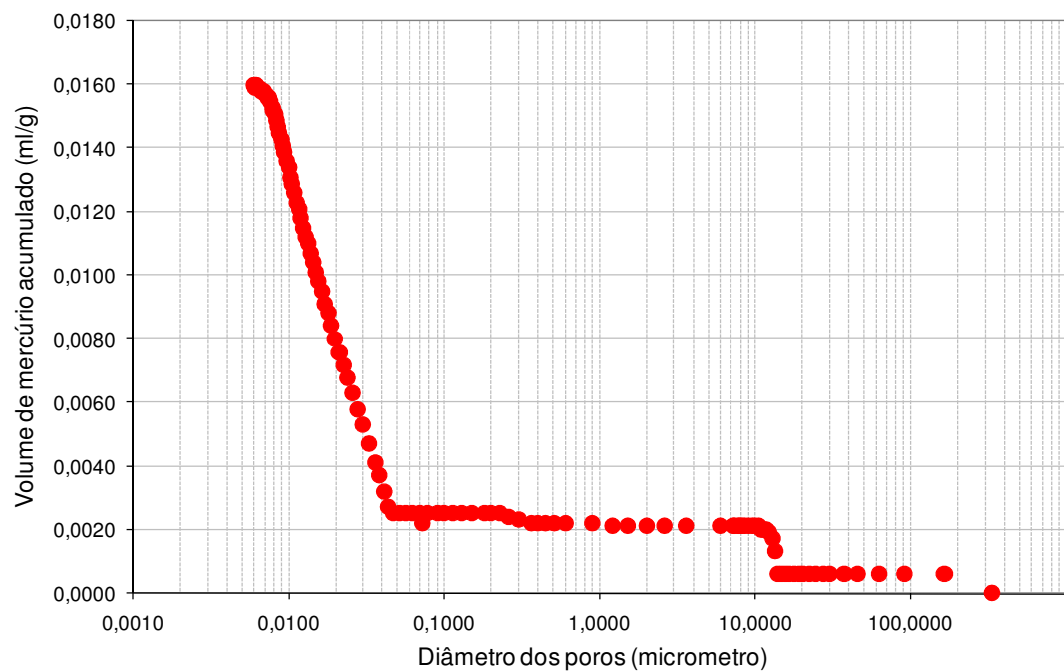


Figura 60. Representação gráfica do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio para o concreto com 3,5% de IAR e resistente à segunda série de ensaios de gelo e degelo – diâmetro dos poros (μm) versus volume de mercúrio acumulado (ml/g).

Pela curva, observa-se que o tamanho crítico do poro é de 0,006 μm e que a porosidade total da amostra é de 4,05%.

A maioria dos poros está compreendida entre a faixa de  $0,006 \mu\text{m} \leq \Phi \leq 0,05 \mu\text{m}$ . O espaçamento crítico entre os poros, calculado segundo Attiogbe (1993), é de 1,19 μm.

Uma vez que esse novo concreto resistiu aos ciclos de gelo/degelo, pode-se concluir que, para concretos dosados de acordo com a teoria de Liborio (2003), a porosidade de 4,05% é suficiente e adequada para atribuir alto desempenho aos concretos submetidos a tais condições.

Comparando-se os resultados desta porosimetria com os resultados dos concretos sem ar incorporado antes de serem submetidos a ciclos de gelo/degelo, conclui-se que:

1. Mesmo incorporando-se 3,5% de ar, o tamanho médio dos poros do novo concreto não apresentou aumento no diâmetro médio dos poros; diminuindo inclusive de 0,0211  $\mu\text{m}$  para 0,0181  $\mu\text{m}$ ;
2. O aumento da porosidade foi devido ao aumento de números de poros, comprovado pelo aumento da área de poros de 1,197  $\text{m}^2/\text{g}$  no CAD (LIMA, 2006) para 3,536  $\text{m}^2/\text{g}$  no novo concreto;
3. O aumento da área específica diminuiu o espaçamento crítico de 2,67  $\mu\text{m}$  no CAD (LIMA, 2006) para 1,19  $\mu\text{m}$  para o novo concreto;
4. Houve um considerável aumento da massa específica de 2,48  $\text{g}/\text{cm}^3$  no CAD (LIMA, 2006) para 2,54  $\text{g}/\text{cm}^3$  para este novo concreto.

A tabela de 26 apresenta os dados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio para amostras extraídas dos corpos-de-prova de concreto submetidas à terceira série de ensaios de gelo e degelo, exceto para a amostra do concreto revibrado e curado em água com cal (RAC), devido à perda da amostra durante o ensaio de porosimetria.

A partir desses dados pode-se observar que a densidade do concreto revibrado é maior em relação aos concretos vibrados.

Tabela 26 – Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio em amostras de concreto - VAC, VCU e RCU.

Dados do ensaio de porosimetria	Amostras		
	VAC	VCU	RCU
Volume total de mercúrio utilizado no ensaio (ml/g)	0,0199	0,0193	0,0131
Área total de poro (m <sup>2</sup> /g)	6,201	4,238	2,014
Diâmetro médio dos poros (volume) (µm)	0,0108	0,0349	0,3525
Diâmetro médio dos poros (área) (µm)	0,0079	0,0079	0,0082
Diâmetro médio dos poros (4V/A) (µm)	0,0128	0,0182	0,0260
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,2193	2,5533	2,3965
Massa aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,3218	2,3538	2,4742
Porosidade (%)	4,41	4,35	3,14

Fonte: Instituto de Física de São Carlos – EESC – USP

O gráfico da figura 61 apresenta as curvas de distribuição de poros versus o volume de mercúrio acumulado.

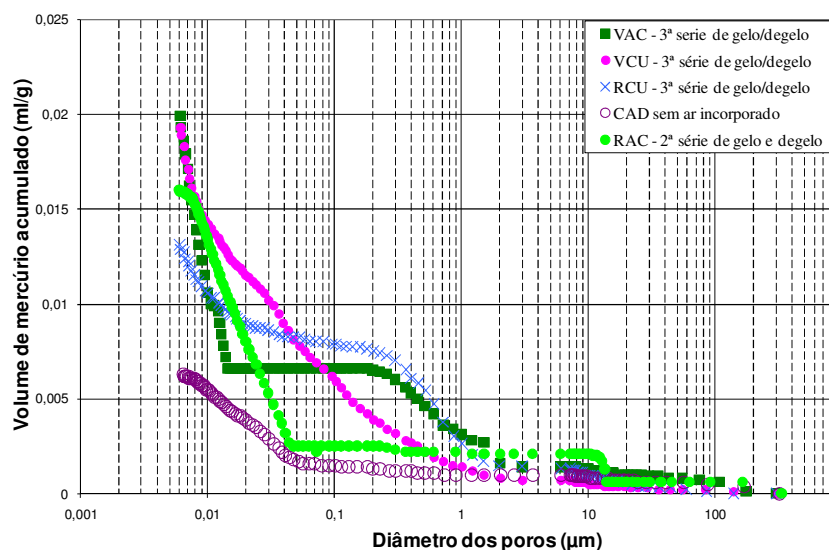


Figura 61. Curvas de distribuição de poros para os concretos expostos aos ciclos de gelo e de gelo nas três séries de ensaios.

A título de comparação, incluíram as curvas referentes à amostra extraída do concreto exposto à segunda série de ensaios de gelo e degelo, pois se trata de uma amostra cujo concreto foi revibrado e curado em água com cal (RAC) e, a curva referente à amostra do concreto sem ar incorporado.

Embora a forma das curvas seja distinta para as amostras, o tamanho crítico de poro para todas as amostras analisadas é muito próximo, sendo de 0,0061  $\mu\text{m}$  para a VAC e para a RCU, 0,0062  $\mu\text{m}$  para VCU, 0,0060  $\mu\text{m}$  para RAC e para o concreto sem ar incorporado.

O espaçamento crítico, calculado segundo Attiogbe (1993), está apresentado na tabela 27.

Tabela 27 – Espaçamento crítico entre os vazios de ar nos concretos expostos aos ciclos de gelo e degelo.

Espaçamento crítico entre os vazios de ar - $\bar{s}$ ( $\mu\text{m}$ )	
CAD sem ar incorporado	2,67
RAC	1,19
VAC	0,62
RCU	2,82
VCU	0,92

Observa-se que o espaçamento crítico para os vazios de ar do concreto RCU foi maior que o espaçamento do concreto sem ar incorporado, o qual não resistiu aos ciclos de gelo e degelo. Entretanto, os corpos-de-prova do concreto RCU tiveram fator de durabilidade (FD) de 103%. Conclui-se que, de fato, o que influenciou para a durabilidade aos ciclos de gelo e degelo foram o volume de vazios e a área específica dos poros. O CAD sem ar incorporado apresentou a porosidade de 1,57%, enquanto o concreto RCU teve sua porosidade de 3,14%.

### 5.2.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Foram preparadas amostras dos concretos expostos às segunda e terceira séries de ensaios de gelo e degelo para obtenção de micrografias eletrônicas de varredura, a fim de verificar a sanidade das amostras e caracterizar a sua microestrutura.



A microscopia eletrônica de varredura foi realizada após os ciclos de gelo e degelo. Na figura 62 estão apresentadas micrografias de amostra do concreto submetido à segunda série de ciclos de gelo e degelo. Nelas ficam explícitas a ausência da zona de transição entre pasta e agregado, bem como a uniformidade e densidade da pasta de cimento.

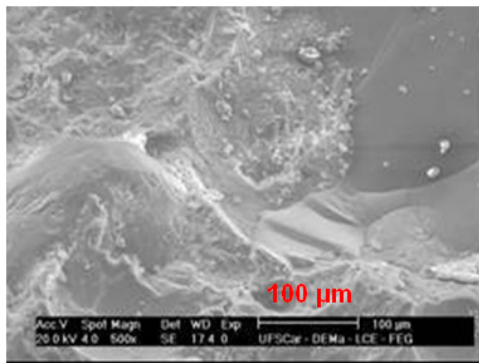
As micrografias 62 a, 62 b, 62 d e 62 f ilustram a interface pasta/agregado, evidenciando a densidade e homogeneidades obtidas.

A micrografia 62 c ilustra a interface pasta/bolha de ar, igualmente densa e homogênea.

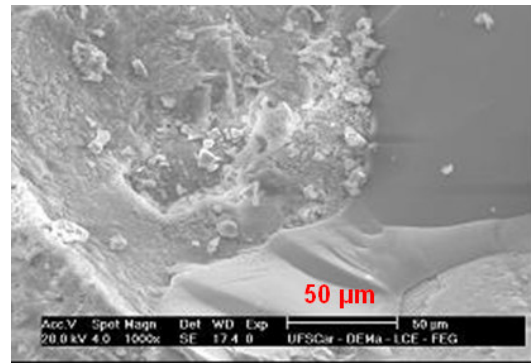
A micrografia 62 e ilustra o C-S-H cuja estrutura reticular foi alterada por conta da reação pozolânica, processo descrito por Mindess (1998) e já citado no item 3 deste trabalho.

Na figura 63 são apresentadas micrografias dos concretos submetidos à terceira série de gelo e degelo, juntamente com as microanálises.

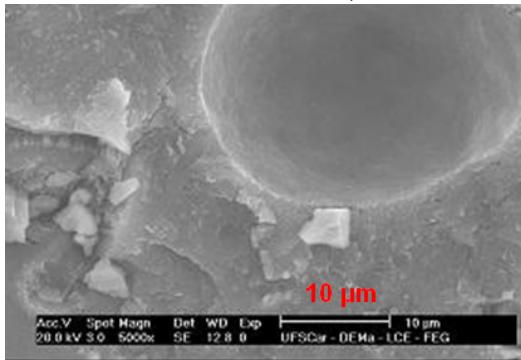
As micrografias da figura 63 possibilitam a observação de uma densa interface entre pasta/agregado e pasta/vazio de ar. A zona de transição entre pasta/agregado é menor que  $1\ \mu\text{m}$  (63.a). O espectro de EDS apresentado na figura 63.b indica a presença de C-S-H cuja composição é de 45,2% de oxigênio, 3,67% de alumínio, 13,52% de sílica, 0,29% de potássio, 33,61% de cálcio e 3,72% de ferro.



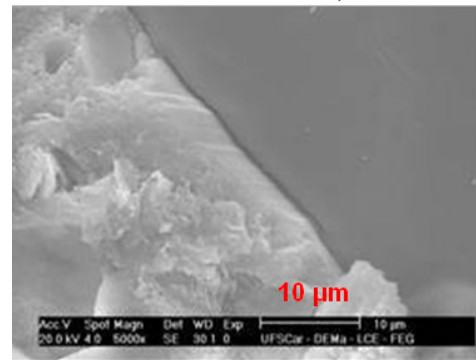
(a) Interface pasta/agregado  
500 x – 20 KV – 17,4 mm



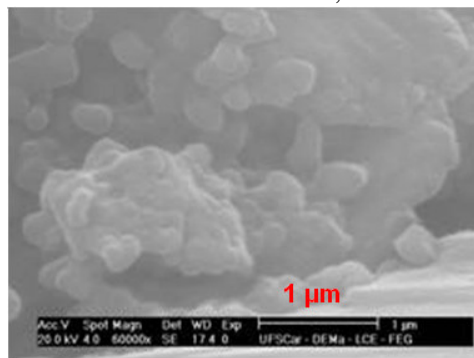
(b) Interface pasta/agregado  
1000 x – 20 KV – 17,4 mm



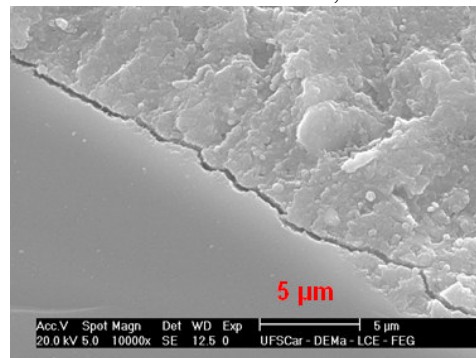
(c) Interface bolha de ar/agregado  
5000 x – 20 KV – 12,8 mm



(d) Interface pasta/agregado  
5000 x – 20KV – 30,1 mm



(e) C-S-H resultante de reação pozolânica  
60000 x – 20 KV – 17,4 mm



(f) Homogeneidade da zona de transição  
10000 x – 20 KV – 12,5 mm

Figura 62. Microestrutura do novo concreto (CAD N) com 3,5% de ar incorporado

A figura 63.c apresenta a zona de transição ao redor de um vazio de ar, cujo espectro de EDS (figura 63.d) indica a composição de 36,44% de oxigênio, 1,74% de alumínio, 8,93% de sílica, 50,27% de cálcio e 2,67% de aço.

A figura 63.e mostra, com uma aproximação de 5000 vezes, a matriz cimentícia e a microanálise do ponto nela indicado, corresponde a composição típica de C-S-H

com: 42,73% de oxigênio, 0,23% de magnésio, 1,60% de alumínio, 16,24% de sílica, 38,21% de cálcio e 0,88% de ferro.

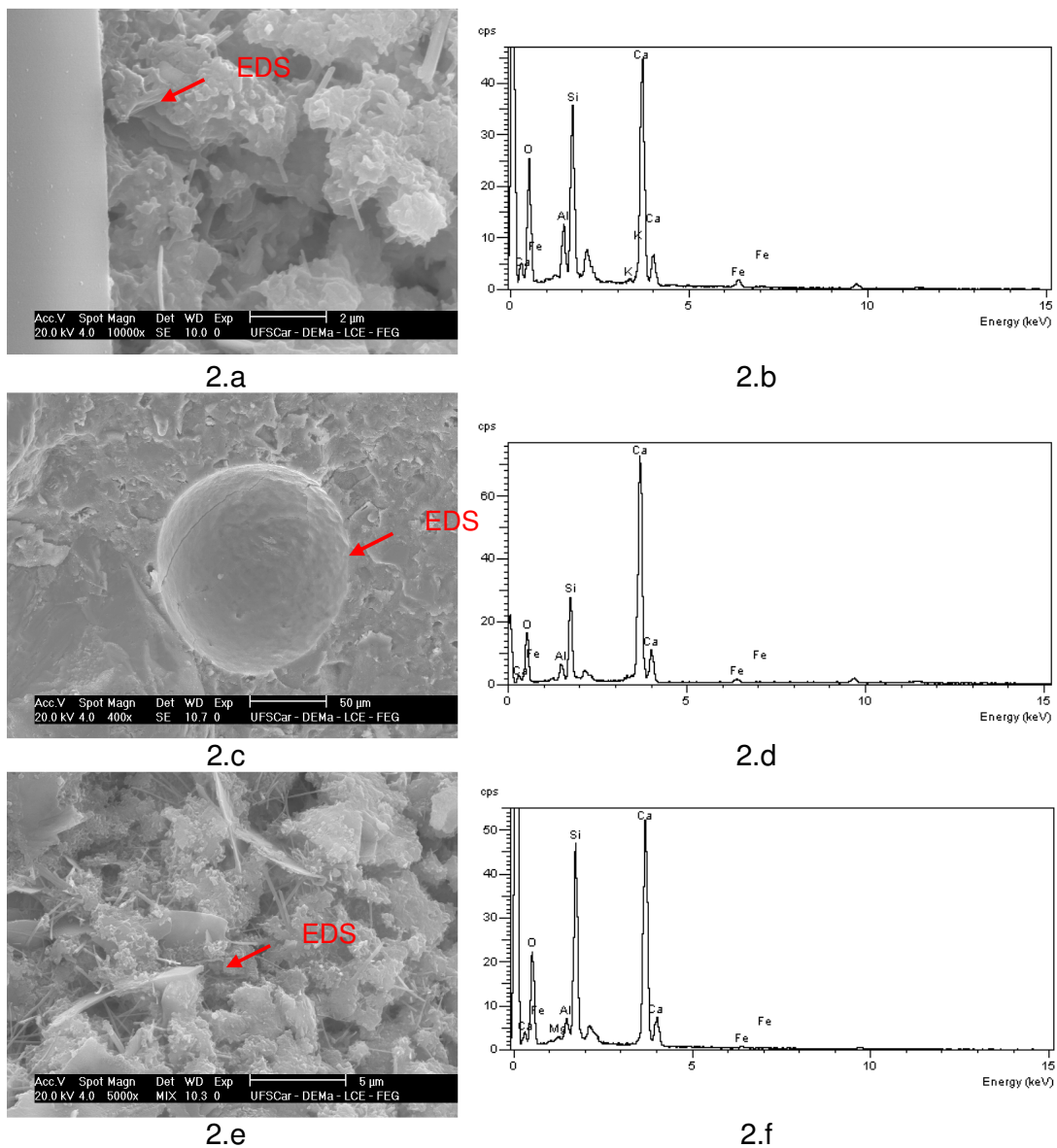


Figura 63. Micrografias e microanálises por energia dispersiva de raio – X de concretos com 3,5%  $\pm$  1% de ar incorporado. (a) Interface pasta/agregado; (b) espectro de EDS do ponto indicado na micrografia 63.a; (c) interface pasta/vazio de ar; (d) espectro de EDS do ponto indicado na micrografia 63.c; (e) produtos de hidratação da pasta de cimento; (f) espectro de EDS do ponto indicado na micrografia 63.e.

### 5.2.6 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado segundo as recomendações da NBR 9778:1987, e, a partir dele pode-se calcular a massa específica do concreto endurecido, o índice de vazios e a absorção de água por imersão.

Foram ensaiados três corpos-de-prova, cujas amostras já haviam sido submetidas à terceira série dos ensaios de gelo e degelo. Somente os concretos com 3,5% de ar incorporado foram ensaiados.

Os resultados estão expressos na tabela 28.

Tabela 28 - Massa específica, índice de vazios e absorção do concreto com 3,5% de ar incorporado.

Amostras	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Índice de Vazios (%)	Absorção (%)
CAD N 1	2,51	7,8	3,4
CAD N 2	2,46	8,3	3,6
CAD N 3	2,52	7,7	3,4

De acordo com HELENE (1983), os concretos podem ser classificados, segundo a absorção de água, em duráveis, quando o percentual for menor do que 4,2%; em normais, quando a absorção estiver entre 4,2% e 6,3% e, para valores maiores que 6,3%, os concretos são considerados deficientes. Com esse critério, os concretos elaborados nesta pesquisa podem ser classificados como duráveis.

## 6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A teoria para o entendimento do comportamento do concreto frente ao congelamento e a ciclos de gelo/degelo começou a ser elaborada a partir de 1945.

Muitos trabalhos a esse respeito vêm sendo desenvolvidos desde então com o intuito de resolver esta adversidade ambiental imposta aos concretos em várias situações, quer sejam naturais ou oriundas de processos artificiais, como é o caso em estudo nesta pesquisa.

Três fatores foram apontados como sendo os principais para garantir a durabilidade do concreto frente a estas ações: a quantidade de ar incorporado, o espaçamento entre as bolhas de ar e a qualidade no projeto e fabricação do concreto.

A maioria dos trabalhos então desenvolvidos baseia-se em dosar os concretos de modo a incorporar  $6\% \pm 1\%$  de ar e obter o espaçamento adequado entre estas bolhas de ar. Há recomendações para que o diâmetro das bolhas seja igual à distância entre as mesmas.

Muitos pesquisadores concordam que o teor de ar a ser incorporado deve ser tal que o espaçamento entre as bolhas de ar seja o suficientemente pequeno para não permitir que a pressão hidráulica ou a difusão da água/gel cause dano às paredes dos capilares do concreto. Há um consenso de que este espaçamento varie de  $200\mu\text{m}$  a  $400\mu\text{m}$  e, portanto as bolhas de ar devem ter aproximadamente este diâmetro.

Os ensaios para determinar tais espaçamentos são muito complexos, havendo a necessidade de microscópio óptico e a preparação de amostras de maneira criteriosa. Além disso, o sucesso de medidas confiáveis depende da habilidade do operador do microscópio. Outrossim, são ensaios demorados e dispendiosos.

Existem dois pontos negativos, sob a ótica desta pesquisadora, em relação a tais procedimentos. O primeiro é de que se deve sempre que possível favorecer práticas mais simples e que sejam acessíveis, de modo a facilitar a implantação das novas tecnologias em campo prático.

O segundo é o tamanho dos vazios constituintes do sistema de poros. Poros com diâmetros de 200  $\mu\text{m}$  certamente prejudicam a resistência mecânica do concreto.

Assim, voltando aos quesitos necessários para projetar concretos duráveis a ciclos de gelo/degelo, há dentre elas uma que vem sendo menos explorada pelos pesquisadores: o processo de fabricação.

Esta pesquisa favoreceu então o processo de fabricação, levando em conta os princípios e propriedades reológicas do concreto, práticas de reforço de interface pasta/agregado, homogeneização e reforço da matriz da pasta de cimento. Todos estes conceitos foram desenvolvidos, testados e comprovados pelo grupo de pesquisadores do LMABC.

Isto levou à produção de concretos resistentes ao congelamento e a ciclos de gelo e degelo, mesmo sem um sistema de poros com espaçamentos e diâmetros de acordo com os que vêm sendo recomendados por muitos pesquisadores.

O gráfico da figura 64 mostra a distribuição dos poros para o concreto resistente ao gelo/degelo e o gráfico da figura 65 mostra a distribuição dos poros para o concreto resistente ao congelamento.

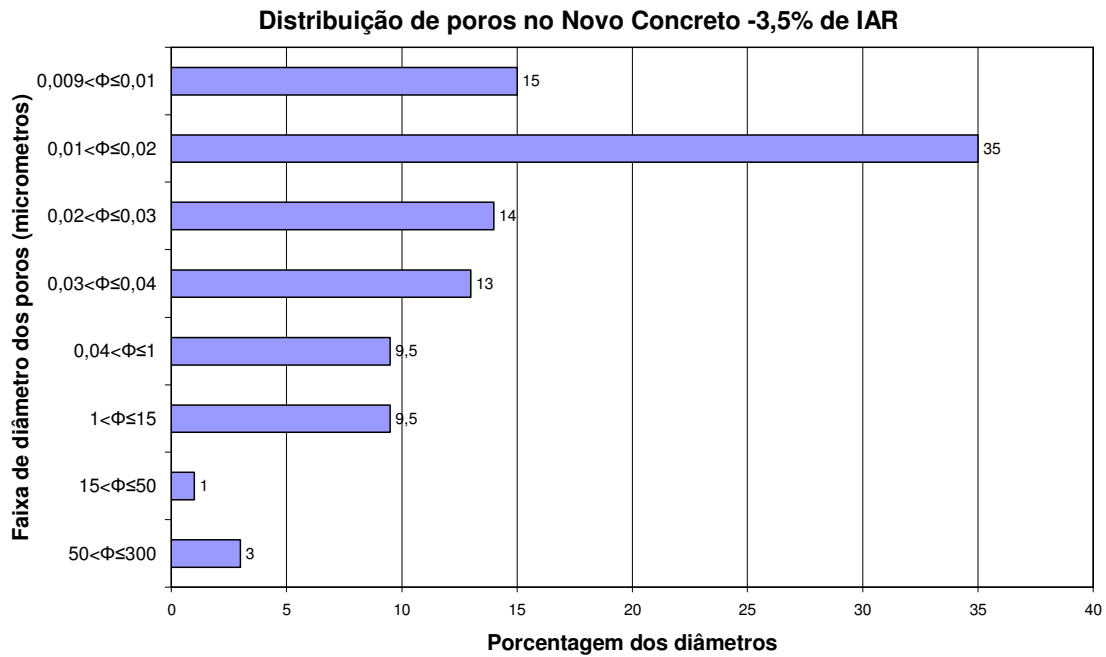


Figura 64. Tamanho médio para os poros no concreto resistente aos ciclos de gelo/degelo.

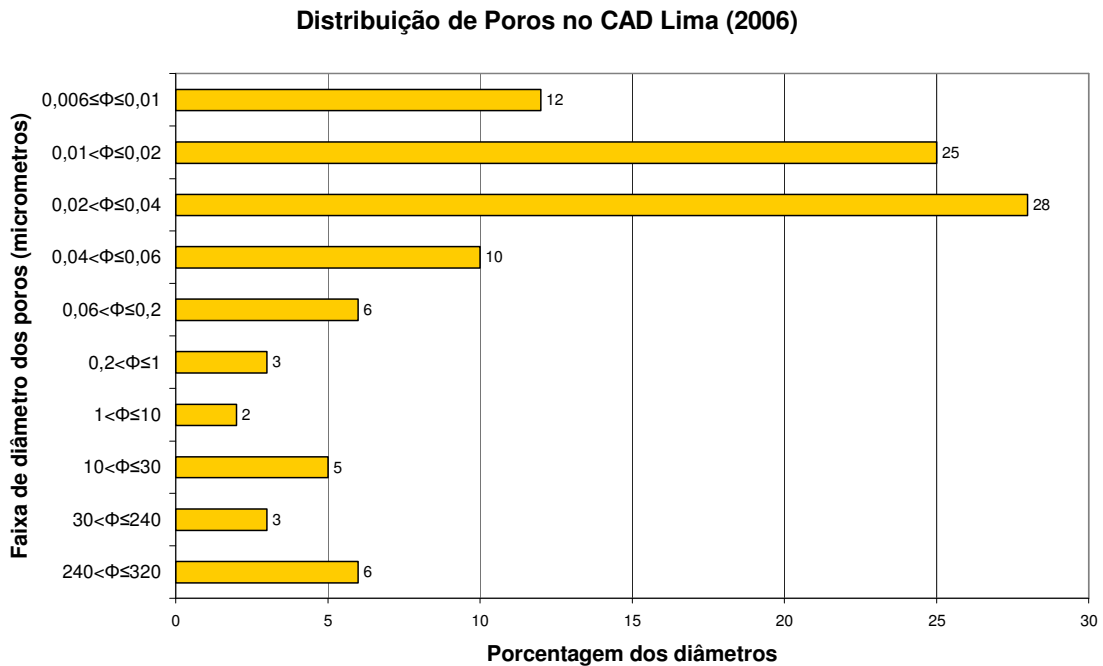


Figura 65. Tamanho médio para os poros do concreto resistente ao congelamento desenvolvido por Lima (2006).

Para o concreto resistente ao gelo/degelo somente 3% dos poros estão compreendidos na faixa de 50 $\mu$ m a 300 $\mu$ m. Isto evidencia a diferença entre este

concreto e os demais estudados. Certamente não foram os vazios com diâmetros entre  $50\mu\text{m}$  e  $300\mu\text{m}$  que protegeram o concreto da ação dos ciclos de gelo e degelo.

O mesmo pode ser constatado para o concreto resistente ao congelamento cuja porcentagem de poros com diâmetros entre  $240\mu\text{m}$  e  $320\mu\text{m}$  é de 6%.

Os concretos de alto desempenho, elaborados segundo as técnicas apresentadas neste trabalho, não favorecem a incorporação de ar para formação de poros com tal grandeza, por serem muito coesos. Essa propriedade do concreto impede que as bolhas de ar coalesçam e ao mesmo tempo, propicia a divisão das bolhas maiores em bolhas menores.

Utilizando-se a expressão proposta por Attiogbe (1993) e com os resultados de área específica obtidos nos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, pôde-se demonstrar que o espaçamento entre os vazios para os concretos elaborados nesta pesquisa variou de  $2,82\mu\text{m}$  a  $0,62\mu\text{m}$ .

O diâmetro médio dos poros foi em torno de  $0,02\mu\text{m}$  e a área específica variou de  $1,197\text{ m}^2/\text{g}$  a  $6,201\text{ m}^2/\text{g}$ .

O concreto resistente ao congelamento, mas não aos ciclos de gelo e degelo, teve o diâmetro dos poros e o espaçamento crítico similar aos dos concretos resistentes aos ciclos de gelo e degelo. O diferencial entre um e outro foi o valor da área específica. Dentre os concretos resistentes aos ciclos de gelo e degelo, a menor área específica foi de  $2,014\text{ m}^2/\text{g}$ . A área específica do concreto resistente somente ao congelamento foi de  $1,197\text{ m}^2/\text{g}$ . A menor porosidade dentre os concretos resistentes aos ciclos de gelo e degelo foi de 3,14% , sendo de 1,57% para o concreto resistente ao congelamento.

Sendo assim, a adversidade imposta pelos ciclos de gelo e degelo, pode ser prevenida não com a incorporação de bolhas de ar com diâmetros da ordem de  $250\mu\text{m}$  e



com volume total de  $6\pm 1\%$  de ar, mas sim com a distribuição de uma fina rede de poros, com diâmetros cerca de 1000 vezes menores que os propostos.

Esta fina rede de poros diminui a temperatura de congelamento da água e a proximidade entre tais vazios (i.e.,  $0,62\mu\text{m}$  a  $2,82\mu\text{m}$ ) reduziu a pressão hidráulica a pontos toleráveis à matriz cimentícia do concreto.

Embora o espaçamento entre estes vazios tenha dimensões desta ordem de grandeza, a desconexão entre eles é garantida devido ao pequeno diâmetro dos poros, ou seja, o diâmetro dos vazios é de 60 a 240 vezes a distância entre a face dos mesmos.

Tal refinamento de poros, promovido pelas adições minerais e pelo empacotamento de agregados, conferiu a este concreto, forças interparticulares elevadas (i.e., forças de van der Waals, forças eletrostáticas) e a necessidade de altas taxas de cisalhamento para deformá-lo.

Os resultados dos módulos de elasticidade aferidos também comprovam este fato. Sabe-se que o módulo de elasticidade tem relação direta com as forças interatômicas ou interparticulares do material, é uma característica muito mais da natureza que das proporções dos constituintes do concreto.

O módulo de elasticidade para os concretos desenvolvidos foi da ordem de 43 GPa, denotando que o projeto do CAD conseguiu atuar na natureza do material. As micrografias apresentadas na seção anterior demonstram a proximidade da matriz cimentícia às demais fases do concreto endurecido, o que corrobora para o aumento da rigidez.

Neste aspecto a técnica da revibração foi atenuante para a rigidez do concreto resistente aos ciclos de gelo/degelo. Mesmo com a incorporação de  $3,5\%$  de ar, o novo concreto apresentou rigidez igual ao do concreto resistente ao congelamento que não teve ar incorporado intencionalmente.

Sendo o concreto um material com propriedades tixotrópicas, Castro (2007) elaborou uma série de ensaios com o mesmo concreto para aferir o torque necessário para provocar sua deformação (cisalhamento) em estado fresco em diferentes intervalos de tempo após o início da hidratação, alternado tempos de parada com a revibração do concreto. Constatou-se que com o aumento do intervalo de tempo, maior deveria ser o torque para cisalhar o material e retorná-lo ao estado fluido.

Portanto, com base em tais experimentos é possível explicar as alterações causadas no concreto pela técnica da revibração: aumento da massa específica e aumento da resistência do concreto nas primeiras idades.

Outra vantagem observada no novo concreto foi a minimização da ação da incorporação de ar na resistência do concreto. Esperava-se que a resistência à compressão do novo concreto fosse de no máximo de 45 MPa e atingiu 50 MPa, isto porque com a incorporação de 3,5% de ar incorporado diminuiria em pelo menos em 17,5% a resistência à compressão (i.e., 5% de queda da resistência para cada 1% de ar incorporado).

Entretanto há que se esclarecer o porquê do concreto sem ar incorporado ter resistido somente ao congelamento e não aos ciclos de gelo/degelo.

A absorção por capilaridade em concretos de alto desempenho é um dos fenômenos que explica este fato.

Silva, F.G. (2006) realizou ensaios para verificar a absorção por capilaridade em micros concretos de alto desempenho. O traço para os micro concretos ensaiados foi de 1:m, m=3,5, com cimento ARI PLUS e CPV ARI RS, a relação  $a/agl$  foi de 0,35.

Por estes ensaios pode-se comprovar que o refinamento de poros promovido pelas adições minerais confere alta tensão superficial aos capilares do concreto

provocando a absorção por capilaridade em certos casos, em até quase que a totalidade de um corpo-de-prova de 10 cm de altura (figura 66).

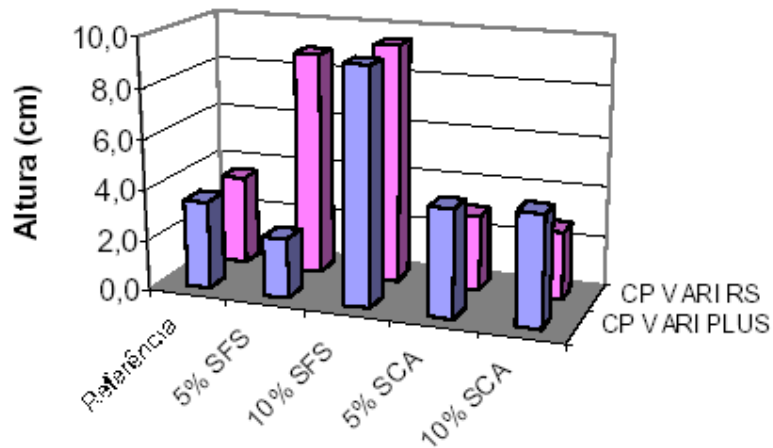


Figura 66.

Altura da ascensão capilar da água em ensaio de absorção de água por capilaridade em corpos-de-prova (cilíndricos com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm) de micro concreto com idade de 28 dias após 72 h de imersão em água. Fonte: Silva, F.G. (2006).

A figura 67 ilustra os corpos-de-prova rompidos após o ensaio de absorção por capilaridade.

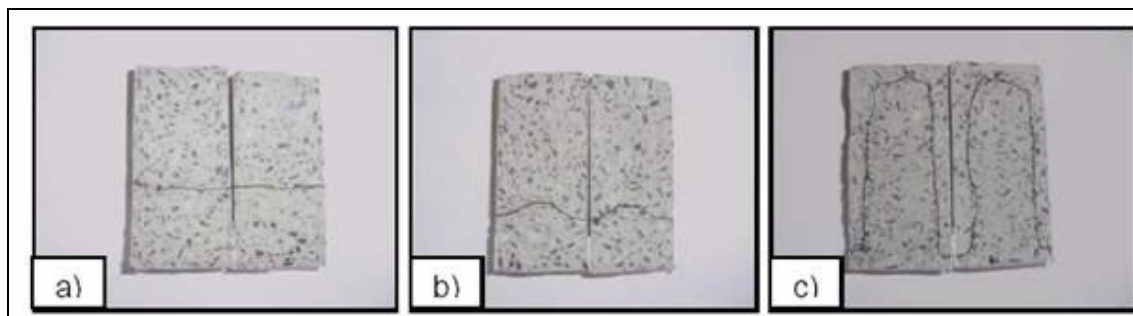


Figura 67. Corpos-de-prova após a ruptura do ensaio de absorção de água por capilaridade: a) referência, b) com sílica de casca do arroz e c) com sílica de ferro silício. Fonte: Silva, F.G. (2006).

Por menor que seja a quantidade de água absorvida para o caso de concretos submetidos a ciclos de gelo/degelo, esta água torna-se potencialmente água congelável.

Durante a fase de degelo do ciclo, os corpos-de-prova permanecem 24 horas submersos em água. Segundo resultados obtidos por Silva, F.G., a diferença da quantidade de água absorvida em 24 h e 72 h, para os micro concretos contendo 10%

sílica de ferro silício na montagem do aglomerante, é  $0,301 \text{ g/cm}^2$  e  $0,353 \text{ g/cm}^2$ , sendo essa diferença correspondente a cerca de 15%. Outro parâmetro que favorece a comparação dos resultados obtidos por Silva, F.G. com os concretos deste trabalho é o diâmetro médio obtido por ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Os micro-concretos de Silva, F.G. apresentaram diâmetro médio de  $0,016 \mu\text{m}$  para os concretos com CP V ARI RS e  $0,025 \mu\text{m}$  para o micro concreto produzido com o cimento CPV ARI Plus. O concreto resistente ao congelamento (LIMA, 2006) apresentou o tamanho médio dos poros de  $0,0211 \mu\text{m}$ .

Para concretos submetidos aos ciclos de gelo/degelo, mesmo esta pequena quantidade torna-se danosa ao concreto no decorrer dos ciclos. Assim para o concreto elaborado por Lima (2006) esta absorção capilar aumentou a água congelável e sua porosidade muito baixa de 1,57% não foi suficiente para impedir os danos causados pela pressão hidráulica ou difusão da água/gel e água/capilar.

No novo concreto, mesmo com a absorção capilar, os 3,5% de ar incorporado que levaram a sua porosidade a 4,05% e aumentou a área específica de poros, sendo essa medida suficiente para evitar os danos provocados pelos mecanismos de deterioração do concreto quando submetido aos ciclos de gelo/degelo.

Outro resultado a ser discutido trata-se da diferença entre a porosidade obtida pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio e o índice de vazios, obtido pelo ensaio de absorção de água por imersão. Esses resultados foram muito diferentes. O volume de vazios foi praticamente o dobro da porosidade obtida pelos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio. O valor médio obtido pelo ensaio de porosimetria foi de 4%; para o ensaio de absorção de água por imersão, o valor médio foi de 7,9%. A absorção de água foi de 3,5%, na média, sendo este valor muito mais próximo dos resultados de porosimetria.

Esta diferença de valores para porosidade e índice de vazios também ocorreu nos trabalhos de SILVA, F.G (2006). Por exemplo, em um micro-concreto de traço 1:M, M= 3,5, o resultado da porosidade total obtida por porosimetria por intrusão de mercúrio foi de 4,37%, já o índice de vazios obtido pelo ensaio de absorção foi de 7,02%.

Isto posto, conclui-se que o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio não atinge toda a rede de poros do concreto. Os poros não preenchidos com o mercúrio devem corresponder a finos capilares, onde a pressão aplicada não é o suficiente para penetrá-los. Em contrapartida, esses capilares, pela sua elevada tensão capilar, conseguem vencer a gravidade e absorver a água para seu interior.

No caso dos ciclos de gelo e degelo, a água contida nesses capilares certamente congela-se a temperaturas muito inferiores a  $-35^{\circ}\text{C}$ . Powers (1945) cita que a água-gel somente se congelará a temperaturas inferiores a  $-78^{\circ}\text{C}$ . Sabendo-se que os espaços interlamelares de C-S-H que contêm a água-gel possui  $0,018\ \mu\text{m}$  e que os poros atingidos pela porosimetria por intrusão de mercúrio têm diâmetro de até  $0,006\ \mu\text{m}$ , conclui-se que os poros não constatados nos ensaios de porosimetria não afetam a análise dos resultados, em se tratando de desempenho frente à temperatura proposta (i.e.,  $-35^{\circ}\text{C}$ ).

Em suma, podem-se estabelecer os itens relacionados a seguir como as principais observações feitas no decorrer da realização da análise experimental realizada nesta pesquisa:

1. O concreto de alto desempenho, resistente ao congelamento, apresentou uma densa matriz de cimento com porosidade de 1,57%, impedindo que a água em seus capilares se congelasse e causasse danos à sua microestrutura. Esses

- resultados puderam ser comprovados por micrografias feitas em microscópio eletrônico de varredura e em ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio;
2. O concreto resistente ao congelamento não apresentou alto desempenho frente a ciclos de gelo e degelo, chegando à ruptura com 60% da frequência natural em 13,16 e 18 ciclos de gelo/degelo, o que corresponde a cerca de 50% do total de ciclos e a um fator de durabilidade de 33%;
  3. Ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, em amostras rompidas de concreto que foram submetidos a ciclos de gelo/degelo, mostraram que a porosidade aumentou de 1,57% antes dos ciclos para 4,22% após a ruptura causada pelo gelo/degelo;
  4. Conclui-se que, durante a fase de degelo, houve absorção de água por capilaridade nos corpos-de-prova de concreto que, ao congelar, causou danos à microestrutura do concreto;
  5. A introdução de 3,5% de ar incorporado no novo concreto baseado na porosidade da amostra rompida, devido a ação dos ciclos de gelo/degelo, apresentou bons resultados, impedindo a ruptura do novo concreto quando submetido a ciclos de gelo e degelo;
  6. A incorporação de ar em concretos de alto desempenho não aumentou significativamente o diâmetro médio dos poros, mas sim a sua área específica, ou seja, os poros continuaram do mesmo tamanho. Aumentou-se, no entanto, o número dos poros, diminuindo, assim, a distância entre eles;
  7. A redução da distância entre os poros minimizou o efeito da pressão hidráulica causada pelo movimento migratório da água durante os ciclos de gelo/degelo;

8. Os ciclos de 48 horas são mais agressivos por aumentarem o grau de saturação dos corpos-de-prova durante o degelo, e, por isso, são adequados para a avaliação com rigor do desempenho de concretos;
9. O concreto com 3,5% de ar incorporado teve fator de durabilidade mínimo de 96 % e máximo de 104 %.
10. O método de dosagem, as práticas de cura e o teor de ar em 3,5% produziram um concreto de alto desempenho frente a temperaturas de até  $-35^{\circ}\text{C}$  e expostos a ciclos de gelo e degelo.
11. O concreto produzido prescindiu a necessidade de se incorporar  $6 \pm 1\%$  de ar ou a redução do fator  $a/agl$  em 0,27 para resistir aos ciclos de gelo e degelo;
12. Os vazios de ar do concreto resistente aos ciclos de gelo e degelo apresentaram diâmetro médio de  $0,02\ \mu\text{m}$ .
13. O espaçamento crítico entre os vazios de ar do concreto não foi fator determinante para seu alto desempenho e sim a área específica de seus poros. Para poros com diâmetro médio de  $0,02\ \mu\text{m}$  foi necessária uma área específica mínima de  $2,014\ \text{m}^2/\text{g}$  para garantir o alto desempenho. Esta área específica levou a um espaçamento crítico entre os vazios de  $2,82\ \mu\text{m}$ .
14. Os concretos que foram revibrados apresentaram menor espaçamento entre os vazios, e menor área específica de poros.
15. A porosidade total, obtida pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, e o índice de vazios, determinado pelo ensaio de absorção de água por imersão, produzem resultados diferentes. O ensaio de absorção de água por imersão apresenta um resultado de índice de vazios cerca de 100% maior.

16. Os ensaios de resistência à compressão, à tração na flexão e do módulo de elasticidade em corpos-de-prova de concreto, após a exposição a ciclos de gelo e degelo, confirmam a sanidade dos mesmos em relação à resistência mecânica.
17. Os ensaios de absorção de água por imersão apresentaram valor de 3,4% para os corpos-de-prova já expostos aos ciclos de gelo e degelo, podendo ser classificado como durável frente à penetração de cloretos e carbonatação com este resultado.

Esta pesquisa resultou na produção de um concreto de alto desempenho frente a ação de baixas temperaturas , inclusive ciclos de gelo e degelo, cuja resistência à compressão foi de 50 MPa, a resistência à tração na flexão de 4,9 MPa, módulo de elasticidade de 43 GPa com um consumo de 7,8 kg de aglomerante por 1 MPa.



## 7 CONCLUSÕES

O concreto de alto desempenho consiste numa poderosa ferramenta que poderá alavancar a Engenharia no Brasil e no mundo. Trata-se de se produzir concreto baseando-se não somente em dados de resistência mecânica, mas muito além disso, pois devem ser contempladas as necessidades de durabilidade, visando alcançar a vida útil proposta em projeto.

Os custos ambientais devem ser cada vez mais considerados em estudos de viabilidade de construções e o concreto de alto desempenho tem, nesse quesito, a maior de suas vantagens: durabilidade, otimização de recursos naturais, emprego de subprodutos de processos industriais.

Entretanto, essa tecnologia ainda está longe de se tornar prática comum nos campos de obra em nosso país e o principal motivo é o desconhecimento dos conceitos do concreto de alto desempenho.

Primeiramente, pensa-se que o concreto de alto desempenho é uma tecnologia com custos de produção muito superiores aos concretos comuns, e supõe-se que os materiais desse concreto proposto sejam inéditos e de difícil aquisição em mercado.

Por isso, é grande o esforço por apresentar o concreto de alto desempenho como tecnologia acessível, ampliando, inclusive, os nichos de aplicação nos mais variados ramos da construção.

O objetivo específico deste trabalho priorizou o projeto e a fabricação de um concreto que atenda às necessidades de indústrias que se utilizam da tecnologia do frio para manusear, industrializar e estocar seus produtos; apresentar, ainda, a alternativa de presença ou não de umidade elevada ou mesmo saturação dos elementos de concreto constituintes dessas plantas industriais.

Esta pesquisa permitiu o desenvolvimento de uma técnica alternativa para a proteção do concreto contra os danos causados pelas baixas temperaturas. Ao invés de se incorporar  $6\pm 1\%$  de vazios de ar com diâmetros da ordem de  $200\ \mu\text{m}$ , espaçados de  $200\ \mu\text{m}$  a  $400\ \mu\text{m}$  no concreto, promoveu-se o refinamento dos seus poros, de modo a impedir que água capilar se congelasse e causasse os danos devido à geração da pressão hidráulica, ou mesmo, pela difusão da água gel/capilar.

A aplicação dessa nova técnica só foi possível devido ao método de dosagem empregado, às técnicas favorecedoras do reforço das diversas interfaces do concreto e às práticas reológicas utilizadas na produção do concreto.

Com o intuito de atender às necessidades da indústria do frio nas possíveis situações em suas plantas industriais, projetaram-se concretos para resistirem às baixas temperaturas em ambientes com ou sem a presença de umidade.

Para ambientes com temperaturas de até  $-35^\circ\ \text{C}$ , sem a presença de umidade, somente o refinamento de poros foi suficiente para proteger o concreto da ação do congelamento. Concretos com porosidade inferior a  $2\%$  e com tamanho médio de poro em torno de  $0,02\ \mu\text{m}$  serão resistentes ao congelamento, pois não favorecerão o congelamento da água intersticial..

Nos ambiente com presença de umidade, o que submete as estruturas de concreto a ciclos de gelo e degelo, além do refinamento de poros, foi necessária a incorporação de ar de modo a produzir um concreto com porosidade total de  $3\%$  a  $4\%$ . O diâmetro médio dos poros para esses concretos foi da mesma ordem de grandeza dos concretos sem ar incorporado.

A caracterização do sistema de vazios dos concretos foi feita pela aplicação de uma expressão desenvolvida a partir de conceitos de probabilidade geométrica e do modelo da estrutura do concreto. O fator de espaçamento entre os vazios do sistema

pôde ser estimado a partir de dados do traço do concreto e da área específica dos vazios. Essa última, obtida pelos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio. Esta expressão é uma alternativa para o cálculo do fator de espaçamento e oferece relativa facilidade quando comparada ao complexo ensaio sugerido pela ASTM C 457/89.

De acordo com as observações feitas na análise experimental os parâmetros que deverão nortear as dosagens de concreto para que resistam às condições de baixas temperaturas são:

1. Resistência à compressão de 50 MPa;
2. Resistência à tração na flexão em torno de 4,9 MPa;
3. Sistema de vazios para concretos submetidos somente ao congelamento: porosidade total (PIM) menor que 2%, diâmetro médio dos poros menor que 0,02  $\mu\text{m}$ , área específica dos poros maior que 1,2  $\text{m}^2/\text{g}$ , fator de espaçamento entre 2 e 3  $\mu\text{m}$ .;
4. Sistema de vazios para concretos submetidos a ciclos de gelo e degelo: porosidade total (PIM) de 3% a 4%, diâmetro médio dos poros menor que 0,02  $\mu\text{m}$ , área específica dos poros maior que 2,1  $\text{m}^2/\text{g}$ , fator de espaçamento entre 2 e 3  $\mu\text{m}$ ;

As técnicas empregadas permitiram a produção de concretos com fator de durabilidade mínimo de 96% segundo a ASTM C666/92 o que o classifica como durável frente a situações de baixas temperaturas.

## 8 PROSSEGUIMENTO DE PESQUISA

O projeto e a fabricação de pisos industriais envolvem outros aspectos que não foram explorados nessa pesquisa, além de alternativas que poderão ser implantadas a fim de aumentar a durabilidade desses elementos construtivos e até viabilizar ainda mais os custos de construção. Sendo assim, sugerem-se para futuras pesquisas, os seguintes temas dentre outros:

1. Análise da estimativa da vida útil do concreto frente aos ataques químicos, causados por agentes de sanitização industrial e detritos industriais, tais como: sangue, gordura, sais, etc.
2. Desenvolvimento de uma camada de revestimento em micro-concreto, com o objetivo de recuperar pavimentos ou mesmo de prolongar a vida útil do elemento.
3. Desenvolvimento de um material para preencher as juntas cuja rigidez suporte as movimentações das placas de piso e ao mesmo tempo suporte as cargas ambientais e funcionais.
4. Análise da interface entre placa de piso e juntas.
5. Verificação da eficiência do uso de fibras metálicas e ou fibras sintéticas na produção de pavimentos de concreto.
6. Produção de concreto auto-adensável resistente ao gelo e degelo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AİTCIN, P.C. Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research**, [S.I], v.30, p. 1349-1359, July 2000.
2. AİTCIN, P.C. The durability characteristics of high performance concrete: a review. **Cement & Concrete Composites**, [S.I], v.25, n.4-5, p.409-420, 2003.
3. AİTCIN, P.C.; NEVILLE, A. How the water-cement ratio affects concrete strength. **Concrete International**. [S.I], v.25, n.8, p. 51-58, august 2003.
4. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional frequencies of concrete specimens: C 215-91**. Philadelphia: ASTM, 1991.6 p.
5. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing: C 666-92**. Philadelphia: ASTM, 1992. 6 p.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de ensaios de: agregados, concreto fresco e concreto endurecido**. 2. São Paulo: ABCP, 2000. 119 p.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de ensaios físicos de cimento**.3. São Paulo: ABCP, 2000. 91 p.
8. ATTIOGBE, E.K. Mean spacing of air voids in hardened concrete. **ACI Materials Journal**. [S.I], v.90, n.2, p. 174-181, march-april 1993.
9. BARBOSA, M.; AKASAKI,J.; VITA, M.; SILVA, E. Análise do concreto de alto desempenho com resíduo de borracha de pneu e cinza de casca de arroz submetido ao ensaio de abrasão. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE MATERIAIS E TECNOLOGIAS NÃO-CONVENCIONAIS NA CONSTRUÇÃO ECOLÓGICA SUSTENTÁVEL, 2006, Salvador. **Anais...**: Salvador/ BA, 2006. Disponível em: <http://www.ppgec.feis.unesp.br/producao2006/An%E1lise%20do%20concreto%20de%20alto%20desempenho%20com%20res%EDduos%20de%20borracha%20de%20pneu%20e%20cinza%20de%20casca%20de%20arroz%20submetido%20ao%20ensaio%20de%20abras%E3o.pdf>.
10. BENTUR, A.; MITCHELL, D. Materials performance lessons. **Cement and Concrete Research**. Amsterdam, v.38, p.259-272, 2008.
11. BOUZOUBAÂ, N.; FOURMIER, B.; MALHOTRA, V.M.; GOLDEN, D.M. Mechanical Properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cement produced in cement plant. **ACI Materials Journal**. [S.I.], v.99, n.6, p.560-567, November/December 2002.

12. CASTRO, A.L.C. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 302 f. Tese (Doutorado) - Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, EESC / IQSC/ IFSC, Universidade de São Paulo, 2007.
13. COOK, R.; HOVER, K.C. Mercury porosimetry of cement-based materials and associated correction factors. **ACI Materials Journal**. [S.I.], v.90, n.2, p.152-161, March/April 1993.
14. CORR, D.J., JUENGER M.C.G., MONTEIRO, P.J., BASTACKY, J. Investigating entrained air voids and Portland cement hydration with low-temperature scanning electron microscopy. **Cement and Concrete Composites**. Amsterdam, v.26, p.1007-1012, 2004.
15. Dally J.W, Rilley W.F., McConnell K.G. **Instrumentation for engineering measurements**. New York: Wiley, 1984. p. 96-101.
16. DIAMOND, S. The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer. **Cement and Concrete Composites**. Amsterdam, v.26, p.919-933, 2004.
17. DETWILER, R.J. et al.. Preparing specimens for microscopy. **Concrete International**, [S.I.], v.23, n.11, p. 51-58, November, 2001.
18. ENÜSTÜN, V.; SOO, K.S.; BERGESON, K.L. Frost susceptibility of concrete in near-saturated states. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S.I.], v.6,p. 290-306, 1994.
19. FAGURY, S.C. Concreto e pastas de elevado desempenho: contribuição aos estudos de reparos estruturais e ligações entre concreto novo e velho, com tratamento da zona de interface. 2002. 143 f.+ anexos. Dissertação (**Mestrado**) - Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, EESC / IQSC/ IFSC, Universidade de São Paulo, 2002.
20. FOY, C.; PIGEON, M.; BANTHIA, N. Freeze-thaw durability and deicer salt resistance of a 0,25 water-cement ratio concrete. **Cement and Concrete Research**. [S.I.], v.18, n.4, p.605- 614, 1988.
21. GRADILONE, C.; MARTINO, V. Os oito motores do desenvolvimento. **Revista Veja**. São Paulo: Editora Abril, ed. 2070, ano 41, n.29, p.66-109, 23 de julho, 2008.
22. GAGNÉ, R. et al. Frost durability of high performance concretes. In: MALIER, Y. **High performance concrete: from material to structure**. London: E & FN Spon, 1992, cap.16, p. 239 -251.
23. GAGNÉ, R.; BOISVERT, A.; PIGEON, M. Effect of superplasticizer dosage on mechanical properties, permeability, and freeze-thaw durability of high-strength concretes with and without silica fume. **ACI Materials Journal**. [S.i.], v.93, n.2, p. 111-120, march-april, 1996.
24. HELENE, P. R. L. La Agressividad del Médico y la Durabilidad del Hormigón. **Hormigón**, AATH, n. 10, p. 25-35, 1983.

25. HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.2.** São Paulo: Pini, 1992. 349 p.
26. Kjaer, B.O. Introduction to shock & vibration. **Bruel and Kjaer technical review.** 1988; 7674 (12-1).
27. LELUSZ, M.; MALASZKIEWICZ, D. Identification of phenomena occurring in porous structure of cement concrete subjected to cyclic freezing and thawing. **Journal of Civil Engineering and Management.** [S.I], v.10,n.1, p.31-36, February, 2004.
28. LI, Y., LANGAN, B.W.; WARD, M.A. Freezing and thawing: comparison between non-air-entrained and air-entrained high-strength concrete. In: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI SP-149.** [S.I]: ACI, 1991, cap.31, p.545-560.
29. LIBORIO, J.B.L. **Estudo patológico das construções de argamassa armada existentes no Brasil.** 1989 . 322 f . Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC, Universidade de São Paulo, 1997.
30. LIBORIO, J.B.L. Concreto de alto desempenho – uma tecnologia simples para produção de estruturas duráveis. **Revista Tèchene,** [S.I], dezembro 2003.
31. LIBORIO, J.B.L; CASTRO, A.L. A importância da avaliação reológica de pastas com e sem sílica ativa para produção de concretos estruturais com cimento Portland para obras marítimas. In: **Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica,** 2004, Rio Grande/RS. Anais...Rio Grande/RS, 2004. CDROM.33
32. LIMA, S.M.DE. **Concreto de alto desempenho em ambientes com baixas temperaturas.** 2006 . 216 f . Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC, Universidade de São Paulo, 2006.
33. LIMA, S.M.DE; LIBORIO, J.B.L. Concreto de alto desempenho em ambientes com baixas temperaturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO 48., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** IBRACON, setembro 2006, CD-ROM 483.
34. MALISKA, A.M. Microscopia eletrônica de varredura. Disponível em : [www.materiais.ufsc.br/lcm/web\\_MEV/MEV\\_Apostila.pdf](http://www.materiais.ufsc.br/lcm/web_MEV/MEV_Apostila.pdf) . Acesso em: 13/04/2008.
35. MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 1994. 573 p.
36. MELO, A.B. **Influência de cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland.** 2000. 245f. + anexos. Tese (Doutorado) - Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, EESC / IQSC/ IFSC, Universidade de São Paulo, 2000.

37. MINDESS, S. Interfaces in concrete. In: SKALNY, J. **Materials science of concrete**. Jan P. Skalny. Westerville: The American Ceramic Society, Inc. 1989, p 163-179.
38. NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. Tradução Eng. Salvador E. Giammusso. 2. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.
39. OKAMOTO, S.; UOMOTO, T. Frost damage mechanism and pore structure of concrete. In: CONCRETE UNDER SEVERE CONDITIONS, 2., 1998, Tromsø, Norway. **Proceedings...** London and New York: E & FN Spon, 1998. p. 429 – 437.
40. PIGEON, M.; GAGNÉ, R.; FOY, C. Critical air-void spacing factors for low water-cement ratio concretes with and without condensed silica fume. **Cement and Concrete Research**. [S.I], v.17, n.6, p.896-906, 1988.
41. POWERS, T.C. A working Hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. **Journal of the American Concrete Institute**. Michigan, v.16, n.4, p. 245-273, February 1945.
42. POWERS, T.C. The air requirement of frost-resistance concrete. **Proceedings Highway Research Board**, [S.I], v.29, p.184-211, 1949.
43. POWERS, T.C.; BROWNYARD, T.L. Studies of physical properties of hardened Portland cement paste: part I. **Concrete International**, [S.I], v.25, n. 8, p.59-70, august 2003. Landmark Series.
44. POWERS, T.C.; HELMUTH, R.A. Theory of volume changes in hardened Portland-cement past during freezing. **Proceedings Highway Research Board**, [S.I], v.32, p.285-297, 1953.
45. RESCHKE, J.S. et al. Avaliação da utilização de escória granulada de fundição com substituição de parte do cimento em concreto. **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, São Carlos, v.2, n.1, p. 78-91, maio 2005.
46. RICHARDSON, I.G. The calcium silicate hydrates. **Cement and Concrete Research**. Amsterdam: v.38, p.137-158, 2008.
47. SARKAR, L.S.; CHANDRA, S.; BERNTSSON, L. Interdependence of microstructure and strength of structural lightweight aggregate concrete. **Cement and Concrete Composite**. London: v.14, p.239-248, 1992.
48. SCRIVENER, K.L. The microstructure of concrete. In: SKALNY, J. **Materials science of concrete**. Jan P. Skalny. Westerville: The American Ceramic Society, Inc. 1989, p 127-161.



49. SILVA, F. G. **Estudo da resistência à corrosão do concreto de alto desempenho frente à ação de cloretos.** Tese (Doutorado) - Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais, EESC / IQSC/ IFSC, Universidade de São Paulo, 2006.
50. SILVA, I.J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura.** 2000. 279 f. Tese (Doutorado) – Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, EESC / IQSC/ IFSC, Universidade de São Paulo, 2000.
51. TAYLOR, H.F.W.; NEWBURY, D.E. An electron microscope study of a mature cement paste. **Cement and Concrete Research.** Amsterdam, v.14, p.565-573, 1984.
52. TERZIAN, P. Prevenção de fissuras por retração plástica de origem climática em pavimentos, pisos e lajes de concreto. **Concreto e Construções**, São Paulo, n.46, p.38-41, abr-mai-jun, 2007.

## **ANEXO A: Súmula da história da constituição do LMABC e da linha de pesquisas em durabilidade das estruturas de concreto e argamassa armada**

Liborio em 1985 iniciou um amplo estudo relacionado à patologia das construções, conforme recomendações feitas por Paulo Helene em 1983, interpretando esses estudos como uma disciplina da Ciência Engenharia.

Faz-se necessário um breve relato histórico para a composição desta idéia. Na década de 1950, Pier Luigi Nervi, um engenheiro italiano realizou uma série de palestras no Brasil, a convite de Pietro Maria Bardi, diretor do Museu de Arte de São Paulo. Após a invenção do ferro-cimento por Lambot em 1948, Pier Luigi Nervi foi seu sucessor na utilização deste material composto por agregados miúdos, cimento Portland e ferro e, a partir de 1943 executou obras de grande porte e de elevado grau de complexidade com este mesmo material, ferro-cimento ou para a linguagem adaptada à engenharia brasileira, argamassa-armada. Dentre estas obras (figura 1) pode-se destacar a primeira obra, um armazém construído na própria fábrica de Nervi em 1943, e o Palácio de exposição de Turim, em 1948, sendo esta obra composta por elementos pré-moldados em argamassa armada e com espessura de 4 a 5 cm para vãos de 95 m (LIBORIO,1989).

Dante Ângelo Osvaldo Martinelli, italiano residente no País, e docente da EESC-USP, foi um dos convidados para as palestras de Nervi, e encantado com tais obras introduziu a argamassa armada (dentro das definições clássicas) no Brasil, na própria Escola de Engenharia de São Carlos, o que serviu de base para entendimento dos atuais concretos de alto desempenho. Muitas obras foram realizadas principalmente a partir da década de 1970, Frederico Schiel, Lafael Petroni, João da Gama Filgueiras Lima, João Bento de

Hanai, dentre outros, impulsionadas por diversos projetos implantados em todo o Brasil (LIBORIO, 1989).



(a)



(b)

Figura 1. (a) Armazém da sociedade Nervi e Bartolli; (b) Palácio de exposição de Turim. Fonte: [www.arq.ufsc.br/~labcon/arq5661/trabalhos\\_2001/argamassa\\_armada/projeto.htm](http://www.arq.ufsc.br/~labcon/arq5661/trabalhos_2001/argamassa_armada/projeto.htm) (15/03/2006).

Entretanto o desconhecimento de técnicas que permitissem projetar concreto ou argamassa armada que levassem em conta os aspectos de durabilidade deu os primeiros sinais de colapso da engenharia, na década de 1970, com a ruína de grandes obras, dentre elas o Pavilhão de Exposições da Gameleira (figura 1), em Belo Horizonte. (LIBORIO, 1989).



Figura 1 – Desabamento do pavilhão de exposições Gameleira. Fonte: [http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp\\_hoje/ju/setembro2007/ju372pag6-7.html](http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/setembro2007/ju372pag6-7.html), acesso em 07/08/2008.

Em 1983, Professor Dr. Paulo Helene proferiu uma palestra na Escola de Engenharia de São Carlos, abordando assuntos inerentes à durabilidade de estruturas e, por conseguinte ao estudo patológico na construção civil. Estando o então aluno de pós-

graduação, hoje Prof. Dr. Jefferson B. L. Liborio, presente neste evento, tomou para si a causa discutida, demonstrando inclusive nos trabalhos que se seguiram, a importância da transformação da argamassa armada anteriormente concebida, em concreto com agregados ainda que compostos com agregados graúdos com  $D_{\text{máx}} < 6,3\text{mm}$ , na durabilidade das estruturas.

Liborio e Hanai deram início a uma série de estudos investigativos que pudessem explicar tais acontecimentos, dando origem a uma nova linha de pesquisa na Escola de Engenharia de São Carlos, que resultou na tese de doutorado de Liborio (1985) sendo que os trabalhos elencados a seguir deram continuidade a tais estudos, desta vez sob a orientação de Libório, já sob a coordenação :

- i. Construção de elementos estruturais de alto desempenho para a Companhia de Desenvolvimento Habitacional do Estado de São Paulo, São Carlos, 1985 e 1986 – Jefferson Liborio & João Bento de Hanai.
- ii. Estudo patológico das construções de argamassa armada existentes no Brasil – São Carlos, 1989 – Tese de Doutorado – Jefferson Liborio & João Bento de Hanai.
- iii. Estudo de materiais alternativos para construção de reatores anaeróbios, São Carlos – 1990 – Prêmio BID – Jefferson Liborio & Eugênio Foresti.
- iv. Contribuição ao estudo das propriedades de concretos estruturais com cimento portland submetidos a cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica - São Carlos, 1995 - Ladislau Afonso;
- v. Estudo da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica na produção de elementos pré-moldados - São Carlos, 1996 - Aluísio Braz de Melo;
- vi. Formas estruturais de argamassa e concreto para elementos de concreto armado - São Carlos, 1996 - Rui Ferraz de Almeida Prado Massoni;

- vii. Argamassas de revestimento com o emprego de materiais pozolânicos - São Carlos, 1998 - Vanessa Silveira Silva;
- viii. Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland - São Carlos, 2000 - Aluísio Braz de Melo;
- ix. Contribuição ao estudo do comportamento mecânico dos revestimentos de argamassa - São Carlos, 2000 - Chistiano Wood Bortoluzzo;
- x. Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura - São Carlos, 2000 - Isac José da Silva;
- xi. Reatores anaeróbios (tipo UASB) para tratamento de esgoto doméstico, executados em concreto e argamassa de alto desempenho: uma alternativa construtiva - São Carlos, 2000 - Luana Maria Marelli.
- xii. Concreto e pastas de elevado desempenho: contribuição aos estudos de reparos estruturais e ligações entre concreto novo e velho, com tratamento da zona de interface - São Carlos, 2002 - Samir C. Fagury.
- xiii. Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa - São Carlos, 2002 - Valdirene Maria Silva.
- xiv. Estudo da atividade pozolânica da sílica da casca de arroz em matrizes de cimento portland - São Carlos, 2003 - George Akira Oda;
- xv. Desenvolvimento de concreto de alto desempenho com adições de cinza e sílica da casca de arroz - São Carlos, 2003 - Fernanda Leal Costenaro;
- xvi. Implantação regional de subsídios para utilização de concretos de alta resistência e alto desempenho - Iniciação Científica, 2003 - Thiago Catoia;

- xvii. Aderência de chapiscos em concretos estruturais - melhoria da microestrutura da zona de interface pela adição da sílica da casca de arroz - São Carlos, 2004 - Vanessa Silveira e Silva;
- xviii. A utilização de agregado graúdo laterítico na produção de concreto de alto desempenho, 2005 – Carlos Jun Futida
- xix. Estudo de concretos de alto desempenho frente a ação de cloretos - São Carlos, 2006 - Fernanda Giannotti Silva;
- xx. Concreto de alto desempenho em ambientes com baixas temperaturas - São Carlos, 2006 - Sandra Maria de Lima.
- xxi. Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho - São Carlos, 2007 - Alessandra Lorenzetti de Castro.
- xxii. Carbonatação – São Carlos, 2007 – Valdirene Maria da Silva.

Todos estes trabalhos permitiram que o concreto aqui apresentasse as inovações quanto ao comportamento ao ser submetido a baixas temperaturas, conforme descrição feita na revisão bibliográfica apresentada.

Não se pode deixar de salientar, no entanto que os avanços conseguidos foram também nas colaborações de outros grupos, destacando-se os pesquisadores, tais como: Hanai, J. B., Helene, P.; Dal Molin, D., Cincoto, M.A., Tezuka, Y., Figueiredo, E., Paulon, V., dentre outros, e algumas empresas: ABCP/SP, Grupo Votorantin, Grupo Holcim, Grupo Sika, Grupo Degusa, Grupo ELKEN-Microsilica, Grupo GRACE.

## ANEXO B: Dados de ensaio do concreto elaborado por Lima (2006)

### B.1 Ensaios de reatividade de aditivos e aglomerantes

Os dados das tabelas de 1 a 16 foram utilizados para construção dos gráficos constantes nas figuras de 52 a 55, correspondentes ao ensaio de Kantro.

Tabela 1 - Dados para ensaio de Kantro: CP II 32 E X Advacast

Mistura	Dosagem SP (%)	Área de Espalhamento (cm <sup>2</sup> )	Espalhamento (mm)	Massa de Pasta (g)
1	0,30%	106	116,4	746,1
2	0,50%	224	168,9	735,7
3	0,70%	295	193,8	717,1
4	0,90%	298	194,9	719,9

Tabela 2 - Dados para ensaio de Kantro: CP II 32 E X Advacast X Microair EC (0,09%)

Mistura	Dosagem SP (%)	Área de Espalhamento (cm <sup>2</sup> )	Espalhamento (mm)	Massa de Pasta (g)
1	0,30%	123	125,0	721,0
2	0,50%	229	170,9	734,5
3	0,70%	261	182,4	721,2
4	0,90%	277	187,9	722,3

Tabela 3 - Dados para ensaio de Kantro: CP II 32 E X Advacast X Microair EC (0,135%)

Mistura	Dosagem SP (%)	Área de Espalhamento (cm <sup>2</sup> )	Espalhamento (mm)	Massa de Pasta (g)
1	0,30%	95	110,2	696,7
2	0,50%	229	170,7	734,9
3	0,70%	253	179,5	727,7
4	0,90%	292	192,7	727,2

Tabela 4 - Dados para ensaio de Kantro: CP II 32 E X Advacast X Microair EC (0,180%)

Mistura	Dosagem SP (%)	Área de Espalhamento (cm <sup>2</sup> )	Espalhamento (mm)	Massa de Pasta (g)
1	0,30%	95	110,1	677,9
2	0,50%	199	159,1	715,6
3	0,70%	269	185,0	728,0
4	0,90%	278	188,0	725,6

Tabela 5 - Dados para ensaio de Kantro: CP II 32 E X Advacast X Microair AS 883E (0,09%)

Mistura	Dosagem SP (%)	Área de Espalhamento (cm <sup>2</sup> )	Espalhamento (mm)	Massa de Pasta (g)
1	0,30%	74	96,8	633,1
2	0,50%	195	157,4	715,2
3	0,70%	253	179,4	720,0
4	0,90%	266	184,2	726,3

Tabela 6 - Dados para ensaio de Kantro: CP II 32 E X Advacast X Microair AS 883E (0,135%)

Mistura	Dosagem SP (%)	Área de Espalhamento (cm <sup>2</sup> )	Espalhamento (mm)	Massa de Pasta (g)
1	0,30%	73	96,6	658,9
2	0,50%	211	164,0	696,6
3	0,70%	241	175,1	714,3
4	0,90%	258	181,2	725,3

Tabela 7 - Dados para ensaio de Kantro: CP II 32 E X Advacast X Microair AS 883E (0,18%)

Mistura	Dosagem SP (%)	Área de Espalhamento (cm <sup>2</sup> )	Espalhamento (mm)	Massa de Pasta (g)
1	0,30%	47	77,0	641,1
2	0,50%	192	156,2	633,3
3	0,70%	230	171,1	670,3
4	0,90%	252	179,1	704,9

Tabela 8 - Dados para ensaio de Kantro: CP II 32 E X Gleniun 51

Mistura	Dosagem SP (%)	Área de Espalhamento (cm <sup>2</sup> )	Espalhamento (mm)	Massa de Pasta (g)
1	0,40%	176	149,6	728,7
2	0,60%	196	157,9	735,4
3	0,80%	222	168,1	729,6
4	1,00%	227	169,9	728,7



Tabela 9 - Dados para ensaio de Kantro: CP II 32 E X Glenium 51 X Microair EC (0,09%)

Mistura	Dosagem SP (%)	Área de Espalhamento (cm <sup>2</sup> )	Espalhamento (mm)	Massa de Pasta (g)
1	0,40%	201	159,8	729,2
2	0,60%	214	165,0	725,3
3	0,80%	224	169,0	728,2
4	1,00%	230	171,0	731,8

Tabela 10 - Dados para ensaio de Kantro: CP II 32 E X Glenium 51 X Microair EC (0,135%)

Mistura	Dosagem SP (%)	Área de Espalhamento (cm <sup>2</sup> )	Espalhamento (mm)	Massa de Pasta (g)
1	0,40%	194	157,1	723,5
2	0,60%	209	163,0	726,7
3	0,80%	216	166,0	724,2
4	1,00%	227	170,0	729,9

Tabela 11 - Dados para ensaio de Kantro: CP II 32 E X Glenium 51 X Microair EC (0,18%)

Mistura	Dosagem SP (%)	Área de Espalhamento (cm <sup>2</sup> )	Espalhamento (mm)	Massa de Pasta (g)
1	0,40%	175	149,4	700,7
2	0,60%	191	156,0	729,2
3	0,80%	214	165,0	731,8
4	1,00%	227	170,0	725,5

Tabela 12 - Dados para ensaio de Kantro: CP II 32 E X Glenium 51 X Microair AS 883E (0,09%)

Mistura	Dosagem SP (%)	Área de Espalhamento (cm <sup>2</sup> )	Espalhamento (mm)	Massa de Pasta (g)
1	0,20%	101	113,4	655,9
2	0,40%	177	150,0	722,8
3	0,60%	214	165,0	728,2
4	0,80%	232	172,0	728,9
5	1,00%	241	175,0	729,0

Tabela 13 - Dados para ensaio de Kantro: CP II 32 E X Gleniun 51 X Microair AS 883E (0,135%)

Mistura	Dosagem SP (%)	Área de Espalhamento (cm <sup>2</sup> )	de Espalhamento (mm)	Massa de Pasta (g)
1	0,20%	118	122,6	658,9
2	0,40%	173	148,6	696,6
3	0,60%	207	162,2	714,3
4	0,80%	223	168,6	725,3
5	1,00%	230	171,0	729,4

Tabela 14 - Dados para ensaio de Kantro: CP II 32 E X Gleniun 51 X Microair AS 883 E (0,18%)

Mistura	Dosagem SP (%)	Área de Espalhamento (cm <sup>2</sup> )	de Espalhamento (mm)	Massa de Pasta (g)
1	0,20%	78	99,4	641,1
2	0,40%	171	147,6	633,3
3	0,60%	194	157,3	670,3
4	0,80%	219	167,1	704,9
5	1,00%	230	171,0	728,7

## A.2 Ensaio com o agregado miúdo

Dados para cálculo do número de angulosidade do agregado miúdo:

1. Massa específica  $\rho = 2,63 \text{ g/cm}^3$
2. Volume do recipiente  $V = 3 \text{ l}$
3. Massa da areia (para o recipiente de 3 l) = 5,359 kg
4. Volume da areia  $V_A = 5,359/2,63 = 2,04 \text{ l}$
5. Índice de vazios  $X\% = (2,04 \times 100)/3 = 68\%$
6. Número de angulosidade  $N.A = 67\% - X\% = 67\% - 68\% = -1\%$

## A.3 Ensaio com o agregado graúdo

Tabela 15 - Empacotamento da brita 19 mm com a brita 12,5 mm

% de brita 19 mm	Massa de brita 19 mm (kg)	Massa de brita 12,5mm (kg)	% de brita 12,5 mm	Massa da Mistura (kg)
100	16,105	-	-	16,105
90	16,105	1,789	10	16,683
80	16,105	2,237	20	17,582
70	16,105	2,876	30	17,784
60	16,105	3,835	40	17,747
50	16,105	5,368	50	17,575

Dados para o ensaio de absorção do agregado graúdo:

1. Massa do agregado seco  $A = 2,971$  kg
2. Massa do agregado submerso  $B = 1,950$  kg
3. Massa do agregado após período de 24 h submerso  $C = 2,980$  kg
4. Massa específica  $\rho = \frac{A}{B - C} = \frac{2,971}{2,980 - 1,950} = 2,88 \text{ g/cm}^3$
5. Absorção (%) =  $\frac{C - A}{A} = \frac{2,980 - 2,971}{2,971} 0,3 \%$

Dados para a determinação do coeficiente volumétrico  $C_v$ :

Tabela 16 - Diâmetro médio dos agregados de um lote com 250 g (composição ótima - 70% de brita 19 mm 30% de 12,5 mm)

	Medidas - D=mm (diâmetro) e $D^3 = \text{mm}^3$ )											
	D	D <sup>3</sup>	D	D <sup>3</sup>	D	D <sup>3</sup>	D	D <sup>3</sup>	D	D <sup>3</sup>	D	D <sup>3</sup>
Diâmetro médio de um lote com 250g de agregados (70% brita 19mm e 30% brita 12,5 mm)	26,8	19248,83	16,9	4826,81	16,1	4173,28	8,6	636,06	9,4	830,58	21,3	9663,60
	31,8	32157,43	17,4	5268,02	14,6	3112,14	10,7	1225,04	12,2	1815,85	20,1	8120,60
	24,1	13997,52	23,3	12649,34	11,5	1520,88	17,4	5268,02	12,8	2097,15	12,6	2000,38
	18,6	6434,86	18,3	6128,49	17,8	5639,75	15,2	3511,81	13,4	2406,10	12	1728,00
	25,2	16003,01	18	5832,00	16,1	4173,28	13,8	2628,07	13,8	2628,07	12,8	2097,15
	21,3	9663,60	17,9	5735,34	18,5	6331,63	15,3	3581,58	12,9	2146,69	13,7	2571,35
	24,9	15438,25	20,4	8489,66	15,8	3944,31	15,3	3581,58	13,5	2460,38	20,4	8489,66
	17,3	5177,72	19,6	7529,54	17,5	5359,38	13,3	2352,64	13,6	2515,46	12,1	1771,56
	20,6	8741,82	19,3	7189,06	16,6	4574,30	11,1	1367,63	14,9	3307,95	12	1728,00
	21,9	10503,46	19,3	7189,06	12,2	1815,85	10,2	1061,21	10,3	1092,73	12,7	2048,38
	18,9	6751,27	16,6	4574,30	15,8	3944,31	13,5	2460,38	10,3	1092,73	13,4	2406,10
	21,3	9663,60	16,8	4741,63	19,3	7189,06	19,7	7645,37	12,1	1771,56	12,1	1771,56
	10,6	1191,02	16,6	4574,30	10,6	1191,02	17,8	5639,75	10,1	1030,30	12,5	1953,13
	9,5	857,38	12,8	2097,15	14,7	3176,52	17,5	5359,38	14,5	3048,63	9,2	778,69
	21,8	10360,23	13,1	2248,09	14,7	3176,52	16,6	4574,30	20,6	8741,82	12,9	2146,69
	21,6	10077,70	15,1	3442,95	10,7	1225,04	17,4	5268,02	15,1	3442,95	13,5	2460,38
	18,2	6028,57	21,6	10077,70	16,5	4492,13	12	1728,00	15,9	4019,68	16,7	4657,46
	19,7	7645,37	15,5	3723,88	12,1	1771,56	12,2	1815,85	13,6	2515,46	12,6	2000,38
	27,3	20346,42	17,4	5268,02	12,9	2146,69	17,2	5088,45	14	2744,00	10,6	1191,02
	20,9	9129,33	17,1	5000,21	13,7	2571,35	8,6	636,06	11,4	1481,54	7,2	373,25
23,9	13651,92	20	8000,00	12,4	1906,62	17,1	5000,21	15,4	3652,26	10,8	1259,71	
19,2	7077,89	18,5	6331,63	9,7	912,67	18,9	6751,27	13,8	2628,07	10,7	1225,04	
23,6	13144,26	17,6	5451,78	12,1	1771,56	11,9	1685,16	12,2	1815,85	9,3	804,36	
22	10648,00	19,5	7414,88	11,4	1481,54	13,4	2406,10	13,4	2406,10	13,1	2248,09	
23,1	12326,39	23,9	13651,92	13,5	2460,38	11,7	1601,61	12,5	1953,13	15,2	3511,81	
20,1	8120,60	16,4	4410,94	10,2	1061,21	9,5	857,38	11,4	1481,54	6,2	238,33	
17,9	5735,34	16,9	4826,81	11,5	1520,88	13,5	2460,38	12,5	1953,13	7,4	405,22	
19,7	7645,37	16,2	4251,53	13,4	2406,10	13,3	2352,64	14,7	3176,52			
19,5	7414,88	14,3	2924,21	14,5	3048,63	15,7	3869,89	12,2	1815,85			
20,6	8741,82	16,2	4251,53	16,2	4251,53	17,4	5268,02	15,7	3869,89			

$$\sum D^3 = 827648 ;$$

Massa da amostra = 248,6 g

Densidade do agregado  $\rho = 2,88 \text{ g/cm}^3$

Volume da amostra  $V = 86319,4 \text{ mm}^3$

$$C_v = \frac{V}{\sum D^3 \times \pi / 6} = \frac{86319,4}{827648 \times \pi / 6} = 0,2$$

#### A.4 Dosagem dos concretos

Tabela 17 - Determinação do teor de argamassa para os concretos do ábaco de dosagem - ensaio realizado para o traço 1:m, m = 5.

INSUMOS	a/c	0,4200	a/c	0,4200	a/c	0,4200	a/c	0,4200
	A+P = M	5,0000	A+P = M	5,0000	A+P = M	5,0000	A+P = M	5,0000
	Teor de arg.(a)	0,5200	Teor de arg.(a)	0,5400	Teor de arg.(a)	0,5600	Teor de arg.(a)	0,5800
	Traço Unitário	10%SFS	Traço Unitário	10%SFS	Traço Unitário	10% SFS	Traço Unitário	10%SFS
Aglomerante								
Cimento	1,0000	0,9000	1,0000	0,9000	1,0000	0,9000	1,0000	0,9000
Sílica		0,0711		0,0711		0,0711		0,0711
PEDRA 19	2,0160	2,0160	1,9320	1,9320	1,8480	1,8480	1,7640	1,7640
PEDRA 12,5	0,8640	0,8640	0,8280	0,8280	0,7920	0,7920	0,7560	0,7560
AREIA 4,8MM	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
AREIA 0,6MM	2,1200	2,1200	2,2400	2,2400	2,3600	2,3600	2,4800	2,4800
Água	0,4200	0,4200	0,4200	0,4200	0,4200	0,4200	0,4200	0,4200
SP	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050
AIA	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Consumo de \_\_\_\_\_  
Cimento(kg/m<sup>3</sup>) 387 386 385 385

Tabela 18 - Resistência à compressão simples para o concreto 1:m, m = 3 do ábaco de dosagem

Idade	F <sub>ci</sub> MPa	Força KN
1 dia	32,7	256,9
1 dia	34,1	267,7
3 dias	51,7	406
3 dias	53,1	416,9
7 dias	73,8	579
7 dias	73,4	576
14 dias	66,5	522
14 dias	89,2	700

21 dias	55,8	438,2
21 dias	75,5	592,8
28 dias	97,4	764,3
28 dias	94,4	741

Tabela 19 - Resistência à compressão simples para o concreto 1:m, m = 5 do ábaco de dosagem

Idade	F <sub>cj</sub> MPa	Força KN
1 dia	10,5	82,4
1 dia	11,8	92,7
3 dias	23,1	181,1
3 dias	29,2	229,2
7 dias	40,8	320,4
7 dias	40,9	321,4
14 dias	51,9	407,2
21 dias	55,4	434,9
21 dias	56,9	446,8
28 dias	65,5	514,5
28 dias	62,6	491,6

Tabela 20 - Resistência à compressão simples para o concreto 1:m, m = 6,5 do ábaco de dosagem.

Idade	F <sub>cj</sub> MPa	Força KN
1 dia	3,4	26,4
1 dia	3,1	24,4
3 dias	12,9	101,5
3 dias	12,8	100,5
7 dias	20,1	157,4
7 dias	20,0	156,8
14 dias	27,1	213
14 dias	22,6	177,1
21 dias	31,7	249
21 dias	33,7	264,3
28 dias	36,8	288,5
28 dias	36,3	284,6

Tabela 21 - Resistência à compressão simples para o concreto 1:m, m = 5, ensaiado à temperatura de -35°C (resultados tratados estatisticamente)

Idade	F <sub>cj</sub> MPa	Força KN
1 dia	10,5	82,1
1 dia	10,4	81,6
1 dia	10,3	81,2
1 dia	10,3	81,2
1 dia	10,4	81,6
1 dia	10,6	83,1
1 dia	10,7	83,8
28 dias	57,6	452,5
28 dias	55,9	438,4
28 dias	56,0	439,4
28 dias	55,8	438,2
28 dias	63,8	500,7
28 dias	61,5	483,1
28 dias	60,8	477,6
63 dias	67,6	530,8
63 dias	66,8	524,44
63 dias	69,3	544,1
63 dias	69,1	542,6
63 dias	68,2	535,2
63 dias	66,1	519,2

Tabela 22 - Resistência à compressão simples para o concreto 1:m, m = 5, com ar incorporado, ensaiado à temperatura de -35°C (resultados tratados estatisticamente)

Idade	F <sub>cj</sub> MPa	Força KN
1 dia	8,0	62,5
1 dia	8,0	62,9
1 dia	7,4	58,4
1 dia	8,4	65,6
1 dia	7,9	62,3
1 dia	8,2	64,2
1 dia	7,9	61,9
28 dias	38,5	302,1
28 dias	41,0	321,7
28 dias	42,1	330,6
28 dias	40,3	316
28 dias	45,5	357,4
28 dias	40,01	314,7
63 dias	49,5	388,2
63 dias	47,7	374,6

63 dias	45,1	354,3
63 dias	44,6	350,4

## ANEXO C – Dados de dosagens de concretos pertencentes ao banco de dados do LMABC

### C.1 Caracterização dos constituintes das pastas e concretos referentes às figuras 39, 40, 41 e 42.

Tabela 1- Caracterização do cimento Portland CP II E32

<i>Composição</i>	
Clinker	67,9%
Escória	17,43%
Sulfatos de cálcio	2,94%
Fíler calcário	11,73%
<i>Composição Potencial</i>	
C <sub>3</sub> S	43,45%
C <sub>2</sub> S	8,28%
C <sub>3</sub> A	5,53%
C <sub>4</sub> AF	7,11%
<i>Propriedade física</i>	
Blaine	390 m <sup>2</sup> /kg

Fonte: Silva (2000).

Tabela 2 – Caracterização dos agregados graúdos e miúdos

<i>Agregado Miúdo: areia de rio da região de São Carlos</i>	
Diâmetro máximo	2,4 mm
Módulo de Finura	2,59
Massa específica	2,65 kg/dm <sup>3</sup>
<i>Agregado Graúdo: rocha basáltica da região de São Carlos</i>	
<i>Brita 1</i>	
Diâmetro máximo	19 mm
Módulo de Finura	6,86
Massa específica	2,96 Kg/dm <sup>3</sup>
<i>Brita 2</i>	
Diâmetro máximo	25 mm
Módulo de Finura	8,96
Massa específica	2,96 Kg/dm <sup>3</sup>

Fonte: Silva (2000).



Tabela 3 – Traços para os concretos referentes às figuras 25 e 26

<b>Traço de Concreto</b>	
Cimento	CP II E 32
Adição mineral	Sílica ativa de ferro silício
Superplastificante	Sikament 300 (Sika)
Traço em massa 1:a:p*:a/agl	1:1, 82: 2, 82: 0, 4
Abatimento	120 ± 20 mm

\* O agregado graúdo foi dosado em 40% de brita 1 e 60% de brita 2.

Fonte: Silva (2000).

## C.2 Caracterização dos constituintes das pastas e concretos referentes à figura 66.

Tabela 1- Caracterização do cimento Portland CP II E32

<b>Composição Potencial</b>		
	CPV ARI Plus	CPV ARI RS
C <sub>3</sub> S	74,3%	42,7%
C <sub>2</sub> S	4,7%	31,8%
C <sub>3</sub> A	9,3%	11,7%
C <sub>4</sub> AF	5,7%	5,2%
<b>Propriedades Físicas</b>		
Massa específica	3,15 g/cm <sup>3</sup>	3,08 g/cm <sup>3</sup>
Blaine	445,7 m <sup>2</sup> /kg	329,3 m <sup>2</sup> /kg

Fonte: Silva, F.G. (2006).

Tabela 2 – Caracterização dos agregados graúdos e miúdos

### **Agregado Miúdo: areia de rio da região de São Carlos**

Diâmetro máximo	2,4 mm
Módulo de Finura	2,03
Massa específica	2,63kg/dm <sup>3</sup>

### **Agregado Graúdo: rocha basáltica da região de São Carlos**

<b>Brita 0</b>	
Diâmetro máximo	9,5 mm
Módulo de Finura	5,29
Massa específica	2,87 Kg/dm <sup>3</sup>

Fonte: Silva, F.G. (2006).

Tabela 3 – Traços para os concretos referentes às figuras 66.

<b>Traço de Concreto</b>		
Cimento	CPV ARI Plus	CPV ARI RS
Adição mineral	Sílica ativa de ferro silício volumétrica	10% em substituição
Superplastificante Glenium 51 - MBT	0,6%	0,5%
Traço em massa	1:0,07407:2,1389:1,75:0,35	1:0,07576:2,1389:1,75:0,35
1:sílica:areia:pedra:a/agl		
Abatimento	230 ± 20 mm	

Fonte: Silva, F.G. (2006).

### C.3 Caracterização dos constituintes dos microconcretos referentes à figura 44.

Tabela 1 – Propriedades físicas dos cimentos utilizados na pesquisa.

Propriedades físicas	CPV ARI Plus	CPV ARI RS
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,12	3,08
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)*	4457	3293
Início de pega (min)	98	137
Fim de pega (min)	188	277
# 200 (%)*	0,2	1,4
# 325 (%)*	2,7	10,6
Resistência à compressão (MPa)*		
1 dia	28,4	16,9
3 dias	43,2	29,6
7 dias	48,4	36,6
28 dias	56,8	46,4

\* Dados fornecidos pela empresa (Grupo Holcim Brasil S/A, 2002).

Fonte: Castro (2007).

Tabela 2 – Propriedades químicas e composição potencial dos cimentos utilizados na pesquisa.

Óxidos	Resultado (%)	
	CPV ARI Plus	CPV ARI RS
SiO <sub>2</sub>	21,16	22,32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,71	5,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,89	1,72
TiO <sub>2</sub>	0,15	0,17
CaO	68,08	63,61
MgO	0,48	1,45
Na <sub>2</sub> O	0,29	0,25
K <sub>2</sub> O	0,56	0,63
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,28	0,19
MnO	Traços	Traços
Cr <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Traços	Traços
Perda ao fogo	2,39	4,15
Composição potencial (%) <sup>(∞)</sup>		
C <sub>3</sub> S	58,95	38,26
C <sub>2</sub> S	10,15	7,66
C <sub>3</sub> A	7,36	4,92
C <sub>4</sub> AF	9,46	6,32

<sup>(∞)</sup> Determinada a partir das equações de Bogue.

Fonte: Castro (2007)

Tabela 3 – Caracterização dos agregados graúdos e miúdos

***Agregado Miúdo: areia de rio da região de São Carlos***

Diâmetro máximo 4,8 mm

999333Módulo de 2,34

Finura

Massa específica 2,61 kg/dm<sup>3</sup>

***Agregado Graúdo: rocha basáltica da região de São Carlos***

*Brita 0*

Diâmetro máximo 9,5 mm

Módulo de Finura 5,29

Massa específica 2,87 Kg/dm<sup>3</sup>

Fonte: Castro (2007)

## ANEXO D – Resultados dos ensaios constantes na análise experimental desta pesquisa.

### D1 – Porosimetria por intrusão de mercúrio da amostra do CAD resistentes ao congelamento projetado por Lima (2006).

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /262  
 OPERATOR: Geraldo Frigo LP 14:01:51 09/12/06  
 SAMPLE ID: REF (2) HP 15:13:02 09/12/06  
 SUBMITTER: Sandra M. de Lima REP 15:13:03 09/12/06

PENETROMETER NUMBER: 9206171500 ADVANCING CONTACT ANGLE: 130.0 deg  
 PENETROMETER CONSTANT: 21.63 æL/pF RECEDING CONTACT ANGLE: 130.0 deg  
 PENETROMETER WEIGHT: 66.3327 g MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm  
 STEM VOLUME: 1.1980 mL MERCURY DENSITY: 13.5335 g/mL  
 MAXIMUM HEAD PRESSURE: 4.6800 psi SAMPLE WEIGHT: 2.7737 g  
 PENETROMETER VOLUME: 4.5564 mL SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 115.6612 g

## LOW PRESSURE:

MERCURY FILLING PRESSURE: 0.5673 psia  
 LAST LOW PRESSURE POINT: 25.2682 psia

## HIGH PRESSURE:

RUN TYPE: AUTOMATIC  
 RUN METHOD: EQUILIBRATED  
 EQUILIBRATION TIME: 10 seconds

## INTRUSION DATA SUMMARY

TOTAL INTRUSION VOLUME = 0.0063 mL/g  
 TOTAL PORE AREA = 1.197 sq-m/g  
 MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) = 0.0278 æm  
 MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) = 0.0120 æm  
 AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) = 0.0211 æm  
 BULK DENSITY = 2.4844 g/mL  
 APPARENT (SKELETAL) DENSITY = 2.5240 g/mL  
 POROSITY = 1.57 %  
 STEM VOLUME USED = 1 % \*\*\*\*

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 2

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /262  
 OPERATOR: Geraldo Frigo LP 14:01:51 09/12/06  
 SAMPLE ID: REF (2) HP 15:13:02 09/12/06  
 SUBMITTER: Sandra M. de Lima REP 15:13:03 09/12/06

PRESSURE psia	PORE DIAMETER æm	MEAN DIAMETER æm	CUMULATIVE VOLUME mL/g	INCREMENTAL VOLUME mL/g	LOG DIFF. VOL dV/dlogD mL/g
0.57	318.7953	318.7953	0.0000	0.0000	1.399E-03
1.08	167.8285	243.3119	0.0004	0.0004	1.235E-03
2.09	86.4822	127.1554	0.0005	0.0001	1.680E-04
3.22	56.2531	71.3677	0.0006	0.0000	2.747E-04
4.33	41.8100	49.0316	0.0006	0.0000	2.028E-04
5.37	33.7085	37.7593	0.0006	0.0000	2.230E-04
6.34	28.5221	31.1153	0.0006	0.0000	3.396E-04
7.30	24.7662	26.6441	0.0006	0.0000	4.077E-04
7.93	22.7940	23.7801	0.0007	0.0000	4.549E-04
8.73	20.7210	21.7575	0.0007	0.0000	5.580E-04
9.49	19.0606	19.8908	0.0007	0.0000	5.298E-04
9.51	19.0199	19.0403	0.0007	0.0000	5.287E-04
10.32	17.5278	18.2738	0.0007	0.0000	4.564E-04
11.10	16.2932	16.9105	0.0007	0.0000	3.488E-04
11.88	15.2242	15.7587	0.0007	0.0000	2.936E-04
12.72	14.2199	14.7220	0.0008	0.0000	3.814E-04

13.75	13.1497	13.6848	0.0008	0.0000	4.614E-04
14.94	12.1092	12.6295	0.0008	0.0000	5.385E-04
16.01	11.2943	11.7018	0.0008	0.0000	6.466E-04
16.90	10.7019	10.9981	0.0008	0.0000	6.796E-04
17.71	10.2133	10.4576	0.0008	0.0000	7.179E-04
18.49	9.7808	9.9970	0.0009	0.0000	8.232E-04
19.22	9.4103	9.5956	0.0009	0.0000	8.846E-04
19.91	9.0843	9.2473	0.0009	0.0000	9.037E-04
20.78	8.7055	8.8949	0.0009	0.0000	9.278E-04
21.45	8.4330	8.5692	0.0009	0.0000	9.480E-04
22.16	8.1620	8.2975	0.0009	0.0000	9.213E-04
22.86	7.9134	8.0377	0.0009	0.0000	8.723E-04
23.49	7.6999	7.8067	0.0010	0.0000	8.113E-04
24.19	7.4754	7.5877	0.0010	0.0000	7.185E-04
24.79	7.2972	7.3863	0.0010	0.0000	6.127E-04
25.27	7.1577	7.2275	0.0010	0.0000	5.268E-04
30.00	6.0282	6.5930	0.0010	0.0000	2.899E-06
50.00	3.6171	4.8226	0.0010	0.0000	0.000E+00
69.67	2.5960	3.1065	0.0010	0.0000	3.580E-05
89.67	2.0170	2.3065	0.0010	0.0000	4.456E-05
119.50	1.5135	1.7652	0.0010	0.0000	3.203E-05
150.50	1.2017	1.3576	0.0010	0.0000	1.860E-04
200.00	0.9043	1.0530	0.0010	0.0000	1.753E-04
248.84	0.7268	0.8156	0.0010	0.0000	2.674E-04
299.50	0.6039	0.6654	0.0011	0.0000	4.099E-04
350.00	0.5168	0.5603	0.0011	0.0000	4.098E-04
400.34	0.4518	0.4843	0.0011	0.0000	4.313E-04
451.00	0.4010	0.4264	0.0012	0.0000	5.112E-04
498.67	0.3627	0.3819	0.0012	0.0000	4.957E-04

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 3

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /262

OPERATOR: Geraldo Frigo

LP 14:01:51 09/12/06

SAMPLE ID: REF (2)

HP 15:13:02 09/12/06

SUBMITTER: Sandra M. de Lima

REP 15:13:03 09/12/06

PRESSURE	PORE	MEAN	CUMULATIVE	INCREMENTAL	LOG DIFF.
psia	DIAMETER	DIAMETER	VOLUME	VOLUME	VOL dV/dlogD
	µm	µm	mL/g	mL/g	mL/g
598.00	0.3024	0.3326	0.0012	0.0000	3.533E-04
698.33	0.2590	0.2807	0.0012	0.0000	6.431E-04
797.50	0.2268	0.2429	0.0013	0.0001	8.352E-04
898.33	0.2013	0.2141	0.0013	0.0000	6.658E-04
996.83	0.1814	0.1914	0.0014	0.0000	3.659E-04
1196.67	0.1511	0.1663	0.0014	0.0000	3.625E-04
1396.17	0.1295	0.1403	0.0014	0.0000	4.987E-04
1596.50	0.1133	0.1214	0.0014	0.0000	6.964E-04
1794.33	0.1008	0.1070	0.0015	0.0001	9.184E-04
1992.50	0.0908	0.0958	0.0015	0.0001	6.659E-04
2295.67	0.0788	0.0848	0.0015	0.0000	4.462E-04
2596.50	0.0697	0.0742	0.0016	0.0000	5.543E-04
2893.50	0.0625	0.0661	0.0016	0.0000	7.932E-04
3194.34	0.0566	0.0596	0.0016	0.0001	1.154E-03
3493.17	0.0518	0.0542	0.0017	0.0001	1.808E-03
3789.17	0.0477	0.0498	0.0018	0.0001	2.723E-03
4091.17	0.0442	0.0460	0.0019	0.0001	4.120E-03
4390.33	0.0412	0.0427	0.0020	0.0001	5.373E-03
4691.00	0.0386	0.0399	0.0022	0.0002	6.109E-03
4987.50	0.0363	0.0374	0.0024	0.0002	6.631E-03
5488.16	0.0330	0.0346	0.0026	0.0003	6.743E-03
5983.66	0.0302	0.0316	0.0029	0.0003	6.586E-03
6485.83	0.0279	0.0291	0.0031	0.0002	6.178E-03
6983.16	0.0259	0.0269	0.0033	0.0002	5.484E-03
7483.32	0.0242	0.0250	0.0035	0.0001	4.998E-03
7986.32	0.0226	0.0234	0.0036	0.0001	4.640E-03
8505.82	0.0213	0.0220	0.0037	0.0001	4.498E-03
9006.16	0.0201	0.0207	0.0039	0.0001	4.422E-03
9501.66	0.0190	0.0196	0.0040	0.0001	4.478E-03
10000.82	0.0181	0.0186	0.0041	0.0001	4.601E-03
10502.32	0.0172	0.0177	0.0041	0.0001	4.717E-03
10998.16	0.0164	0.0168	0.0042	0.0001	4.849E-03
11503.49	0.0157	0.0161	0.0043	0.0001	4.952E-03
11995.66	0.0151	0.0154	0.0044	0.0001	5.050E-03
12497.66	0.0145	0.0148	0.0045	0.0001	5.216E-03

12997.99	0.0139	0.0142	0.0046	0.0001	5.386E-03
13495.66	0.0134	0.0137	0.0047	0.0001	5.459E-03
13994.16	0.0129	0.0132	0.0048	0.0001	5.634E-03
14493.66	0.0125	0.0127	0.0049	0.0001	5.825E-03
14999.82	0.0121	0.0123	0.0050	0.0001	5.986E-03
15498.16	0.0117	0.0119	0.0051	0.0001	6.094E-03
15990.66	0.0113	0.0115	0.0051	0.0001	6.151E-03
16489.82	0.0110	0.0111	0.0052	0.0001	6.172E-03
16987.49	0.0106	0.0108	0.0053	0.0001	6.171E-03
17492.16	0.0103	0.0105	0.0054	0.0001	6.081E-03

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 4

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /262

OPERATOR: Geraldo Frigo

LP 14:01:51 09/12/06

SAMPLE ID: REF (2)

HP 15:13:02 09/12/06

SUBMITTER: Sandra M. de Lima

REP 15:13:03 09/12/06

PRESSURE	PORE	MEAN	CUMULATIVE	INCREMENTAL	LOG DIFF.
psia	DIAMETER	DIAMETER	VOLUME	VOLUME	VOL dV/dlogD
	µm	µm	mL/g	mL/g	mL/g
17991.16	0.0101	0.0102	0.0055	0.0001	5.971E-03
18491.32	0.0098	0.0099	0.0055	0.0001	5.858E-03
18984.99	0.0095	0.0097	0.0056	0.0001	5.744E-03
19486.16	0.0093	0.0094	0.0057	0.0001	5.584E-03
19986.32	0.0090	0.0092	0.0057	0.0001	5.352E-03
20484.16	0.0088	0.0089	0.0058	0.0001	5.108E-03
20986.16	0.0086	0.0087	0.0058	0.0000	4.862E-03
21483.66	0.0084	0.0085	0.0059	0.0001	4.595E-03
21985.33	0.0082	0.0083	0.0059	0.0001	4.328E-03
22483.49	0.0080	0.0081	0.0060	0.0001	4.069E-03
22983.83	0.0079	0.0080	0.0060	0.0000	3.814E-03
23480.16	0.0077	0.0078	0.0061	0.0000	3.567E-03
23978.33	0.0075	0.0076	0.0061	0.0000	3.331E-03
24479.00	0.0074	0.0075	0.0061	0.0000	3.129E-03
24979.66	0.0072	0.0073	0.0061	0.0000	2.972E-03
25476.66	0.0071	0.0072	0.0061	0.0000	2.820E-03
25980.33	0.0070	0.0070	0.0062	0.0000	2.677E-03
26473.67	0.0068	0.0069	0.0062	0.0000	2.560E-03
26976.00	0.0067	0.0068	0.0062	0.0000	2.484E-03
27476.00	0.0066	0.0066	0.0062	0.0000	2.449E-03
27979.34	0.0065	0.0065	0.0062	0.0000	2.434E-03
28473.00	0.0064	0.0064	0.0063	0.0000	2.428E-03
28971.84	0.0062	0.0063	0.0063	0.0000	2.427E-03
29470.67	0.0061	0.0062	0.0063	0.0000	2.429E-03
29966.50	0.0060	0.0061	0.0063	0.0000	2.434E-03
29460.50	0.0061	0.0061	0.0063	0.0000	0.000E+00
28963.50	0.0062	0.0062	0.0063	0.0000	0.000E+00
28465.83	0.0064	0.0063	0.0063	0.0000	0.000E+00
27970.50	0.0065	0.0064	0.0063	0.0000	0.000E+00
27473.16	0.0066	0.0065	0.0063	0.0000	0.000E+00
26978.83	0.0067	0.0066	0.0063	0.0000	0.000E+00
26474.66	0.0068	0.0068	0.0063	0.0000	0.000E+00
25966.82	0.0070	0.0069	0.0063	0.0000	0.000E+00
25479.32	0.0071	0.0070	0.0063	0.0000	0.000E+00
24979.98	0.0072	0.0072	0.0063	0.0000	0.000E+00
24479.48	0.0074	0.0073	0.0063	0.0000	0.000E+00
23975.65	0.0075	0.0075	0.0063	0.0000	0.000E+00
23469.48	0.0077	0.0076	0.0063	0.0000	0.000E+00
22983.31	0.0079	0.0078	0.0063	0.0000	0.000E+00
22477.81	0.0080	0.0080	0.0063	0.0000	0.000E+00
21978.47	0.0082	0.0081	0.0063	0.0000	0.000E+00
21485.47	0.0084	0.0083	0.0063	0.0000	0.000E+00
20980.63	0.0086	0.0085	0.0063	0.0000	0.000E+00
20479.30	0.0088	0.0087	0.0063	0.0000	0.000E+00
19983.13	0.0091	0.0089	0.0063	0.0000	0.000E+00

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 5

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /262  
 OPERATOR: Geraldo Frigo  
 SAMPLE ID: REF (2)  
 SUBMITTER: Sandra M. de Lima

LP 14:01:51 09/12/06  
 HP 15:13:02 09/12/06  
 REP 15:13:03 09/12/06

PRESSURE psia	PORE DIAMETER æm	MEAN DIAMETER æm	CUMULATIVE VOLUME mL/g	INCREMENTAL VOLUME mL/g	LOG DIFF. VOL dv/dlogd mL/g
18980.96	0.0095	0.0093	0.0063	0.0000	0.000E+00
17989.62	0.0101	0.0098	0.0063	0.0000	0.000E+00
16979.45	0.0107	0.0104	0.0063	0.0000	0.000E+00
15988.28	0.0113	0.0110	0.0063	0.0000	0.000E+00
14990.11	0.0121	0.0117	0.0063	0.0000	0.000E+00
13989.94	0.0129	0.0125	0.0063	0.0000	0.000E+00
12988.77	0.0139	0.0134	0.0063	0.0000	0.000E+00
11990.27	0.0151	0.0145	0.0063	0.0000	0.000E+00
10992.93	0.0165	0.0158	0.0063	0.0000	0.000E+00
9991.59	0.0181	0.0173	0.0063	0.0000	0.000E+00
8985.92	0.0201	0.0191	0.0063	0.0000	0.000E+00
7989.75	0.0226	0.0214	0.0063	0.0000	0.000E+00
6996.58	0.0259	0.0242	0.0063	0.0000	0.000E+00
5994.25	0.0302	0.0280	0.0063	0.0000	0.000E+00
4986.25	0.0363	0.0332	0.0063	0.0000	0.000E+00
3989.41	0.0453	0.0408	0.0063	0.0000	0.000E+00
3000.41	0.0603	0.0528	0.0063	0.0000	0.000E+00
1993.24	0.0907	0.0755	0.0063	0.0000	0.000E+00
1004.74	0.1800	0.1354	0.0063	0.0000	0.000E+00
900.41	0.2009	0.1904	0.0063	0.0000	0.000E+00
793.24	0.2280	0.2144	0.0063	0.0000	0.000E+00
598.25	0.3023	0.2652	0.0063	0.0000	0.000E+00
397.91	0.4545	0.3784	0.0063	0.0000	0.000E+00
200.25	0.9032	0.6789	0.0063	0.0000	0.000E+00
100.08	1.8071	1.3552	0.0063	0.0000	0.000E+00
59.58	3.0354	2.4213	0.0063	0.0000	0.000E+00
29.92	6.0451	4.5403	0.0063	0.0000	0.000E+00

D2 - Resistência à compressão simples para os concretos com e sem ar incorporado ensaiados aos ciclos de gelo/degelo.

Tabela 1 – Dados do ensaio de resistência à compressão – CAD sem ar incorporado – Idade de 1 dia

Resistência à compressão - Idade de 1 dia		
Data 03/05/2006		
Fcj	Resistência	Força
CP1	16,27	127,7
CP2	15,92	125
CP3	16,34	128,3
CP4	16,38	128,6
CP5	15,81	124,1
CP6	15,90	124,8
CP7	16,48	129,4

Tabela 2 – Dados do ensaio de resistência à compressão – CAD sem ar incorporado – idade de 7 dias

<b>Resistência à compressão - idade 7 dias</b>		
<b>Data 09/05/2006</b>		
<b>Fcj</b>	<b>Resistência</b>	<b>Força</b>
CP1	44,73	351,1
CP2	41,31	324,3
CP3	41,73	327,6
CP4	40,74	319,8
CP5	41,71	327,4
CP6	41,91	329
CP7	40,08	314,6

Tabela 3 – Dados do ensaio de resistência à compressão – CAD sem ar incorporado – idade 28 dias

<b>Resistência a compressão - idade 28 dias</b>		
<b>Data 30/05/2006</b>		
<b>Fcj</b>	<b>Resistência</b>	<b>Força</b>
CP1	58,39	458,4
CP2	61,59	483,5
CP3	57,94	454,8
CP4	58,76	461,3
CP5	55,63	436,7
CP6	60,68	476,3

Tabela 4 – Dados do ensaio de resistência à compressão – CAD com 6±1% de ar incorporado – idade 1 dia

<b>Resistência à compressão - Idade de 1 dia</b>		
<b>Data 05/05/2006</b>		
<b>Fcj</b>	<b>Resistência ( Mpa)</b>	<b>Força (KN)</b>
CP1	7,71	60,5
CP2	7,94	62,3
CP3	7,76	60,9
CP4	7,73	60,7
CP5	7,57	59,4
CP6	8,22	64,5
CP7	7,86	61,7



Tabela 5 – Dados do ensaio de resistência à compressão – CAD com  $6\pm 1\%$  de ar incorporado – idade 7 dias

<b>Resistência à compressão - Idade de 7 dias</b>		
<b>Data 11/05/2006</b>		
<b>Fcj</b>	<b>Resistência ( Mpa)</b>	<b>Força (KN)</b>
CP1	27,55	216,3
CP2	27,11	212,8
CP3	29,16	228,9
CP4	26,74	209,9
CP5	26,19	205,6
CP6	26,98	211,8
CP7	28,37	222,7

Tabela 6 – Dados do ensaio de resistência à compressão – CAD com  $6\pm 1\%$  de ar incorporado – idade 28 dias

<b>Resistência à compressão - Idade de 28 dias</b>		
<b>Data 01/06/2006</b>		
<b>Fcj</b>	<b>Resistência ( Mpa)</b>	<b>Força (KN)</b>
CP1	42,14	330,8
CP2	47,06	369,4
CP3	40,38	317
CP4	45,11	354,1
CP5	39,71	311,7
CP6	42,17	331
CP7	39,95	313,6

D 3 – Dados do ensaio o módulo de elasticidade para os concretos com e sem ar incorporado

Tabela 7 – Dados do ensaio para determinação do módulo de elasticidade aos 28 dias para o concreto sem ar incorporado

Módulo de Elasticidade para Concreto sem ar incorporado							
<i>Corpo-de-prova 1</i>				<i>Corpo-de-prova 2</i>			
Fck (N/mm <sup>2</sup> )	Deformação $\mu\epsilon$	Deformação (mm/mm)	Módulo (Mpa)	Fck (N/mm <sup>2</sup> )	Deformação $\mu\epsilon$	Deformação (mm/mm)	Módulo (Mpa)
1,6	3	0,003	53333,33	1,4	3	0,003	46667
1,5	4	0,004	37500,00	1,6	4	0,004	40000
4,5	9	0,009	50000,00	4,3	10	0,01	43000
11,6	25	0,025	46400,00	6,6	15	0,015	44000
18,9	42	0,042	45000,00	8,9	20	0,02	44500
21,4	47	0,047	45531,91	11,3	26	0,026	43462
23,7	53	0,053	44716,98	13,6	32	0,032	42500
12,2	33	0,033	36969,70	16	37	0,037	43243
2,9	11	0,011	26363,64	20,9	49	0,049	42653
6,8	14	0,014	48571,43	23,5	55	0,055	42727
			<b>43438,70</b>				<b>43275</b>
<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>							<b>43</b>

Tabela 8 – Dados do ensaio para determinação do módulo de elasticidade aos 28 dias para o concreto com 6±1% ar incorporado

Módulo de Elasticidade para Concreto sem ar incorporado							
<i>Corpo-de-prova 1</i>				<i>Corpo-de-prova 2</i>			
Fck (N/mm <sup>2</sup> )	Deformação $\mu\epsilon$	Deformação (mm/mm)	Módulo (Mpa)	Fck (N/mm <sup>2</sup> )	Deformação $\mu\epsilon$	Deformação (mm/mm)	Módulo (Mpa)
1,4	3	0,003	46667	0,3	1	0,00001	30000
1,3	4	0,004	32500	1,2	5	0,00005	24000
2,8	6	0,006	46667	5,6	10	0,0001	56000
4,8	10	0,01	48000	8,1	15	0,00015	54000
5,3	12	0,012	44167	9,9	20	0,0002	49500
6,2	15	0,015	41333	11,9	26	0,00026	45769
8,4	20	0,02	42000	14,8	35	0,00035	42286
9,8	24	0,024	40833	16,8	42	0,00042	40000
11,8	30	0,03	39333	18,2	49	0,00049	37143
13,2	34	0,034	38824				
14,7	38	0,038	38684				
16,2	42	0,042	38571				
16,7	43	0,043	38837				
18,1	47	0,047	38511				
18,7	50	0,05	37400				
			<b>40822</b>				<b>42078</b>
<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>							<b>41</b>

D 4 – Dados do ensaio de gelo/degelo dos concretos com e sem ar incorporado  
 Tabela 9 – Frequências naturais para os ensaios de gelo/degelo dos concretos com e sem ar incorporado projetados por Lima (2006)

<b>Ensaio de Gelo / Degelo - Concretos com e sem ar incorporado - 31/07/2006 a 03/10/2006</b>									
Número de Ciclos (N)	<b>CAD SEM AR INCORPORADO</b>				<b>CAD COM AR INCORPORADO</b>				
	<i>Frequência Natural (hz)</i>				<i>Frequência Natural (hz)</i>				
	<i>Gelo</i>	<i>Degelo</i>	<i>Dc (%)</i>	<i>FD (%)</i>	<i>Gelo</i>	<i>Degelo</i>	<i>Dc (%)</i>	<i>FD (%)</i>	
1	Ref.	1607	1594		Ref.	1426	1432		
	CAD 1	1560	1572	105	3 CAD 1	1486	1486	99	3
	CAD 2	1580	1602	105	3 CAD 2	1429	1451	103	3
	CAD 3	1593	1605	104	3 CAD 3	1468	1484	103	3
2	Ref.	1587	1587		Ref.	1422	1415		
	CAD 1	1708	1564	104	6 CAD 1	1586	1485	112	7
	CAD 2	1715	1608	106	7 CAD 2	1531	1449	114	7
	CAD 3	1740	1592	102	6 CAD 3	1585	1469	118	7
3	Ref.	1574	1561		Ref.	1404	1443		
	CAD 1	1704	1565	104	10 CAD 1	1590	1443	113	11
	CAD 2	1726	1600	105	10 CAD 2	1519	1483	112	11
	CAD 3	1728	1590	102	10 CAD 3	1597	1555	120	11
4	Ref.	1555	1552		Ref.	1388	1388		
	CAD 1	1702	1555	102	13 CAD 1	1589	1436	92	12
	CAD 2	1720	1600	105	13 CAD 2	1510	1446	102	13
	CAD 3	1729	1581	101	13 CAD 3	1593	1483	103	13
5	Ref.	1525	1538		Ref.	1373	1373		
	CAD 1	1704	1540	100	16 CAD 1	1550	1453	94	15
	CAD 2	1717	1600	105	16 CAD 2	1539	1454	103	16
	CAD 3	1730	1560	98	15 CAD 3	1602	1492	105	16
6	Ref.	1535	1533		Ref.	1373	1376		
	CAD 1	1707	1513	97	18 CAD 1	1552	1449	94	18
	CAD 2	1710	1586	103	19 CAD 2	1544	1454	103	19
	CAD 3	1733	1556	97	18 CAD 3	1606	1500	106	20
7	Ref.	1535	1536		Ref.	1373	1374		
	CAD 1	1704	1433	87	19 CAD 1	1545	1460	95	21
	CAD 2	1722	1578	102	22 CAD 2	1543	1455	103	23
	CAD 3	1727	1522	93	20 CAD 3	1572	1462	100	22
8	Ref.	1536	1530		Ref.	1374	1371		
	CAD 1	1699	1337	76	19 CAD 1	1598	1468	96	24
	CAD 2	1726	1567	100	25 CAD 2	1541	1460	104	26
	CAD 3	1735	1478	88	22 CAD 3	1576	1464	101	25

Número de Ciclos (N)	CAD SEM AR INCORPORADO					CAD COM AR INCORPORADO				
	Frequência Natural (hz)					Frequência Natural (hz)				
	Gelo	Degelo	Dc (%)	FD (%)		Gelo	Degelo	Dc (%)	FD (%)	
9	Ref.	1532	1532			Ref.	1371	1376		
	CAD 1	1700	1258	67		19 CAD 1	1525	1462	95	27
	CAD 2	1730	1561	100		28 CAD 2	1537	1457	103	29
	CAD 3	1715	1415	81		23 CAD 3	1567	1466	101	28
10	Ref.	1538	1537			Ref.	1375	1380		
	CAD 1	1677	1156	57		18 CAD 1	1552	1467	96	30
	CAD 2	1715	1560	99		31 CAD 2	1533	1460	104	32
	CAD 3	1712	1354	74		23 CAD 3	1572	1464	101	31
11	Ref.	1531				Ref.	1372			
	CAD 1	1675		0		0 CAD 1	1556		0	0
	CAD 2	1720		0		0 CAD 2	1504		0	0
	CAD 3	1704		0		0 CAD 3	1570		0	0
12	Ref.	1528	1533			Ref.	1368	1372		
	CAD 1	1686	1005	43		16 CAD 1	1571	1464	96	36
	CAD 2	1728	1440	85		32 CAD 2	1514	1415	98	37
	CAD 3	1711	1227	61		23 CAD 3	1574	1466	101	38
13	Ref.	1528	1524			Ref.	1365	1364		
	CAD 1	1661	915	35		14 CAD 1	1550	1470	96	39
	CAD 2	1713	1334	73		30 CAD 2	1508	1426	99	40
	CAD 3	1714	1074	46		19 CAD 3	1575	1468	101	41
14	Ref.	1530	1528			Ref.	1368	1372		
	CAD 1			0		0 CAD 1	1596	1460	95	42
	CAD 2	1698	1231	62		27 CAD 2	1499	1430	100	44
	CAD 3	1692	995	40		17 CAD 3	1562	1472	102	45
15	Ref.		1532			Ref.		1362		
	CAD 1			0		0 CAD 1		1476	97	46
	CAD 2		1161	55		26 CAD 2		1425	99	46
	CAD 3		984	39		18 CAD 3		1472	102	48
16	Ref.	1534	1535			Ref.	1367	1370		
	CAD 1			0		0 CAD 1	1572	1471	97	48
	CAD 2	1712	1084	48		24 CAD 2	1520	1434	100	50
	CAD 3	1690	895	32		16 CAD 3	1587	1471	102	51

Número de Ciclos (N)	CAD SEM AR INCORPORADO				CAD COM AR INCORPORADO				
	Frequência Natural (hz)				Frequência Natural (hz)				
	Gelo	Degelo	Dc (%)	FD (%)	Gelo	Degelo	Dc (%)	FD (%)	
17	Ref.	1540			Ref.	1379			
	CAD 1		0	0	CAD 1	1472	97	51	
	CAD 2	962	38	20	CAD 2	1423	99	52	
	CAD 3		0	0	CAD 3	1469	101	54	
18	Ref.	1530	93	52	Ref.	1364	92	52	
	CAD 1		0	0	CAD 1	1475	97	55	
	CAD 2	902	33	19	CAD 2	1428	99	56	
	CAD 3		0	0	CAD 3	1468	101	57	
19	Ref.	1525		0	Ref.	1362	1360		
	CAD 1		0	0	CAD 1	1581	1470	96	57
	CAD 2		0	0	CAD 2	1535	1428	99	59
	CAD 3		0	0	CAD 3	1593	1474	102	61
20	Ref.	1528			Ref.	1366			
	CAD 1		0	0	CAD 1	1475	97	61	
	CAD 2		0	0	CAD 2	1426	99	62	
	CAD 3		0	0	CAD 3	1474	102	64	
21	Ref.	1527			Ref.	1368			
	CAD 1		0	0	CAD 1	1474	97	64	
	CAD 2		0	0	CAD 2	1424	99	65	
	CAD 3		0	0	CAD 3	1473	102	67	
22	Ref.	1518			Ref.	1356			
	CAD 1		0	0	CAD 1	1475	97	67	
	CAD 2		0	0	CAD 2	1426	99	68	
	CAD 3		0	0	CAD 3	1483	103	71	
23	Ref.	1525	1521		Ref.	1357	1362		
	CAD 1		0	0	CAD 1	1576	1476	97	70
	CAD 2		0	0	CAD 2	1528	1476	106	76
	CAD 3		0	0	CAD 3	1586	1478	103	74

Número de Ciclos (N)	CAD SEM AR INCORPORADO				CAD COM AR INCORPORADO			
	Frequência Natural (hz)				Frequência Natural (hz)			
	Gelo	Degelo	Dc (%)	FD (%)	Gelo	Degelo	Dc (%)	FD (%)
24	Ref.	1521			Ref.	1356	1364	
	CAD 1		0	0	CAD 1	1571	1476	97
	CAD 2		0	0	CAD 2	1520	1426	99
	CAD 3		0	0	CAD 3	1589	1479	103
25	Ref.	1529			Ref.	1369		
	CAD 1		0	0	CAD 1	1622		0
	CAD 2		0	0	CAD 2	1524		0
	CAD 3		0	0	CAD 3	1590		0
26	Ref.	1532	1536		Ref.	1372	1382	
	CAD 1			0	CAD 1	1579	1478	97
	CAD 2			0	CAD 2	1527	1430	100
	CAD 3			0	CAD 3	1590	1479	103
27	Ref.	1536	1539		Ref.	1377	1380	
	CAD 1			0	CAD 1	1581	1481	98
	CAD 2			0	CAD 2	1534	1430	100
	CAD 3			0	CAD 3	1596	1481	103
28	Ref.		1540		Ref.		1370	
	CAD 1			0	CAD 1		1479	98
	CAD 2			0	CAD 2		1432	100
	CAD 3			0	CAD 3		1478	103
29	Ref.	1529	1536		Ref.	1365	1372	
	CAD 1			0	CAD 1	1572	1474	97
	CAD 2			0	CAD 2	1536	1483	107
	CAD 3			0	CAD 3	1597	1480	103
30	Ref.	1528	1516		Ref.	1368	1358	
	CAD 1			0	CAD 1	1583	1477	97
	CAD 2			0	CAD 2	1530	1431	100
	CAD 3			0	CAD 3	1597	1479	103
31	Ref.	1530			Ref.	1364	1365	
	CAD 1			0	CAD 1	1575	1475	97
	CAD 2			0	CAD 2	1528	1470	105
	CAD 3			0	CAD 3	1595	1480	103
32	Ref.	1528			Ref.	1364	1365	
	CAD 1			0	CAD 1	1581	1474	97
	CAD 2			0	CAD 2	1536	1435	100
	CAD 3			0	CAD 3	1595	1480	103

Tabela 10 - Valores da frequência natural, temperaturas e umidades ambientes para os corpos-de-prova de referência para o ensaio de gelo/degelo de concretos com e sem ar incorporado

Data	Temperatura ambiente (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Frequência Natural (Hz)	
			CAD sem IAR	CAD com IAR
31/7/06	18	40	1586	1421
1/8/06	20	41	1607	1426
2/8/06	19	39	1594	1432
3/8/06	18	38	1587	1422
4/8/06	19	36	1587	1415
5/8/06	20	45	1574	1404
6/8/06	22	50	1561	1394
7/8/06	21	51	1555	1388
8/8/06	21	52	1552	1388
9/8/06	20	40	1525	1373
10/8/06	20	50	1538	1373
11/8/06	22	50	1535	1373
12/8/06	23	45	1533	1376
13/8/06	23	48	1535	1373
14/8/06	23	52	1536	1374
15/8/06	23	49	1536	1374
16/8/06	23	47	1530	1371
17/8/06	24	53	1532	1371
18/8/06	24	54	1532	1376
19/8/06	24	55	1538	1375
20/8/06	22	51	1537	1380
21/8/06	23	44	1531	1372
23/8/06	18	42	1528	1368
24/8/06	21	36	1533	1372
25/8/06	23	43	1528	1365
26/8/06	22	46	1524	1364
27/8/06	22	67	1530	1368
28/8/06	23	62	1528	1372
30/8/06	18	45	1532	1362
31/8/06	19	52	1534	1367
1/9/06	23	61	1535	1370
3/9/06	22	59	1540	1379
5/9/06	16	47	1530	1364
6/9/06	17	46	1525	1362
9/9/06	22	51	1528	1366
11/9/06	23	52	1527	1368
13/9/06	24	46	1518	1356
14/9/06	25	44	1525	1357
15/9/06	26	42	1521	1362
16/9/06	26	51	1521	1356
17/9/06	24	59	1529	1364
18/9/06	24	56	1527	1369
21/9/06	24	81	1536	1382
23/9/06	25	63	1539	1380
25/9/06	21	65	1540	1370
27/9/06	19	65	1536	1372
28/9/06	21	61	1528	1368
30/9/06	21	74	1530	1364

## D 5 – Porosimetria por intrusão de mercúrio da amostra danificada pelo ciclo de gelo/degelo do concreto sem ar incorporado

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA /261  
 OPERATOR: Geraldo Frigo LP 10:04:24 09/12/06  
 SAMPLE ID: GID(3) 60% FN HP 11:13:11 09/12/06  
 SUBMITTER: Sandra M. de Lima REP 11:13:12 09/12/06

PENETROMETER NUMBER: 9206171500 ADVANCING CONTACT ANGLE: 130.0 deg  
 PENETROMETER CONSTANT: 21.63 æL/pF RECEDING CONTACT ANGLE: 130.0 deg  
 PENETROMETER WEIGHT: 66.3319 g MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm  
 STEM VOLUME: 1.1980 mL MERCURY DENSITY: 13.5335 g/mL  
 MAXIMUM HEAD PRESSURE: 4.6800 psi SAMPLE WEIGHT: 3.2687 g  
 PENETROMETER VOLUME: 4.5564 mL SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 112.1517 g

## LOW PRESSURE:

MERCURY FILLING PRESSURE: 0.4790 psia  
 LAST LOW PRESSURE POINT: 25.3176 psia

## HIGH PRESSURE:

RUN TYPE: AUTOMATIC  
 RUN METHOD: EQUILIBRATED  
 EQUILIBRATION TIME: 10 seconds

## INTRUSION DATA SUMMARY

TOTAL INTRUSION VOLUME = 0.0182 mL/g  
 TOTAL PORE AREA = 3.806 sq-m/g  
 MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) = 0.0267 æm  
 MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) = 0.0108 æm  
 AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) = 0.0192 æm  
 BULK DENSITY = 2.3145 g/mL  
 APPARENT (SKELETAL) DENSITY = 2.4164 g/mL  
 POROSITY = 4.22 %  
 STEM VOLUME USED = 5 % \*\*\*\*

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 2

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA /261  
 OPERATOR: Geraldo Frigo LP 10:04:24 09/12/06  
 SAMPLE ID: GID(3) 80% FN HP 11:13:11 09/12/06  
 SUBMITTER: Sandra M. de Lima REP 11:13:12 09/12/06

PRESSURE psia	PORE DIAMETER æm	MEAN DIAMETER æm	CUMULATIVE VOLUME mL/g	INCREMENTAL VOLUME mL/g	LOG DIFF. VOL dV/dlogD mL/g
0.48	377.5849	377.5849	0.0000	0.0000	5.461E-04
1.04	173.9626	275.7738	0.0002	0.0002	4.843E-04
2.02	89.4403	131.7015	0.0002	0.0001	1.995E-04
2.95	61.3234	75.3819	0.0003	0.0000	1.391E-04
3.85	46.9185	54.1210	0.0003	0.0000	1.765E-04
4.89	37.0229	41.9707	0.0003	0.0000	2.723E-04
5.97	30.2759	33.6494	0.0003	0.0000	2.259E-04
7.05	25.6422	27.9591	0.0004	0.0000	2.514E-04
8.37	21.6115	23.6269	0.0004	0.0000	3.193E-04
9.41	19.2149	20.4132	0.0004	0.0000	2.904E-04
9.98	18.1177	18.6663	0.0004	0.0000	2.939E-04
10.74	16.8438	17.4808	0.0004	0.0000	2.894E-04
11.39	15.8852	16.3645	0.0004	0.0000	3.010E-04



12.01	15.0592	15.4722	0.0004	0.0000	2.909E-04
12.66	14.2819	14.6705	0.0004	0.0000	2.974E-04
13.31	13.5909	13.9364	0.0004	0.0000	2.858E-04
13.93	12.9881	13.2895	0.0004	0.0000	2.461E-04
14.45	12.5152	12.7516	0.0004	0.0000	2.449E-04
15.05	12.0190	12.2671	0.0005	0.0000	2.754E-04
15.81	11.4422	11.7306	0.0005	0.0000	3.004E-04
16.44	11.0005	11.2214	0.0005	0.0000	3.334E-04
16.96	10.6653	10.8329	0.0005	0.0000	3.734E-04
17.82	10.1473	10.4063	0.0005	0.0000	4.410E-04
18.90	9.5717	9.8595	0.0005	0.0000	5.075E-04
20.14	8.9794	9.2755	0.0005	0.0000	5.529E-04
21.35	8.4702	8.7248	0.0005	0.0000	6.006E-04
22.75	7.9486	8.2094	0.0005	0.0000	6.598E-04
23.65	7.6480	7.7983	0.0005	0.0000	6.783E-04
24.56	7.3630	7.5055	0.0006	0.0000	6.661E-04
25.32	7.1438	7.2534	0.0006	0.0000	6.592E-04
29.84	6.0613	6.6026	0.0006	0.0000	5.305E-04
49.67	3.6412	4.8513	0.0007	0.0001	2.262E-04
69.67	2.5960	3.1186	0.0007	0.0000	2.246E-04
89.84	2.0132	2.3046	0.0008	0.0000	5.564E-04
119.34	1.5156	1.7644	0.0008	0.0001	7.021E-04
149.50	1.2098	1.3627	0.0009	0.0001	7.264E-04
201.17	0.8991	1.0544	0.0010	0.0001	1.082E-03
249.67	0.7244	0.8117	0.0011	0.0001	1.580E-03
300.16	0.6025	0.6635	0.0013	0.0001	1.833E-03
349.33	0.5177	0.5601	0.0014	0.0001	1.984E-03
401.16	0.4509	0.4843	0.0015	0.0001	2.004E-03
449.33	0.4025	0.4267	0.0016	0.0001	1.960E-03
498.66	0.3627	0.3826	0.0017	0.0001	1.978E-03
598.66	0.3021	0.3324	0.0019	0.0002	2.192E-03
697.49	0.2593	0.2807	0.0020	0.0002	2.350E-03

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 3

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /261  
 OPERATOR: Geraldo Frigo  
 SAMPLE ID: GID(3) 80% FN  
 SUBMITTER: Sandra M. de Lima

LP 10:04:24 09/12/06  
 HP 11:13:11 09/12/06  
 REP 11:13:12 09/12/06

PRESSURE psia	PORE DIAMETER µm	MEAN DIAMETER µm	CUMULATIVE VOLUME mL/g	INCREMENTAL VOLUME mL/g	LOG DIFF. VOL dV/dlogD mL/g
798.82	0.2264	0.2429	0.0022	0.0001	2.428E-03
898.49	0.2013	0.2139	0.0023	0.0001	2.610E-03
998.15	0.1812	0.1912	0.0024	0.0001	2.850E-03
1197.48	0.1510	0.1661	0.0027	0.0002	3.313E-03
1396.15	0.1295	0.1403	0.0029	0.0002	3.735E-03
1596.48	0.1133	0.1214	0.0031	0.0002	4.072E-03
1793.81	0.1008	0.1071	0.0033	0.0002	4.337E-03
1995.64	0.0906	0.0957	0.0036	0.0002	4.607E-03
2298.47	0.0787	0.0847	0.0038	0.0003	5.131E-03
2595.30	0.0697	0.0742	0.0041	0.0003	5.818E-03
2894.46	0.0625	0.0661	0.0044	0.0003	6.536E-03
3192.63	0.0567	0.0596	0.0047	0.0003	7.293E-03
3490.46	0.0518	0.0542	0.0050	0.0003	8.218E-03
3791.62	0.0477	0.0498	0.0053	0.0003	9.946E-03
4091.62	0.0442	0.0460	0.0056	0.0003	1.245E-02
4388.78	0.0412	0.0427	0.0061	0.0004	1.466E-02
4689.27	0.0386	0.0399	0.0066	0.0005	1.612E-02
4988.60	0.0363	0.0374	0.0071	0.0005	1.675E-02
5486.93	0.0330	0.0346	0.0077	0.0007	1.634E-02
5984.25	0.0302	0.0316	0.0083	0.0006	1.545E-02
6485.58	0.0279	0.0291	0.0089	0.0005	1.473E-02
6986.74	0.0259	0.0269	0.0093	0.0004	1.393E-02
7483.74	0.0242	0.0250	0.0097	0.0004	1.324E-02

7983.23	0.0227	0.0234	0.0101	0.0004	1.276E-02
8508.90	0.0213	0.0220	0.0104	0.0003	1.233E-02
9004.39	0.0201	0.0207	0.0107	0.0003	1.207E-02
9505.06	0.0190	0.0196	0.0110	0.0003	1.193E-02
10009.72	0.0181	0.0185	0.0113	0.0003	1.188E-02
10501.39	0.0172	0.0176	0.0115	0.0003	1.195E-02
11000.89	0.0164	0.0168	0.0117	0.0002	1.212E-02
11503.38	0.0157	0.0161	0.0120	0.0002	1.238E-02
12001.55	0.0151	0.0154	0.0122	0.0002	1.270E-02
12504.71	0.0145	0.0148	0.0124	0.0002	1.311E-02
12997.88	0.0139	0.0142	0.0127	0.0002	1.359E-02
13498.21	0.0134	0.0137	0.0129	0.0002	1.408E-02
13996.54	0.0129	0.0132	0.0131	0.0002	1.454E-02
14491.87	0.0125	0.0127	0.0133	0.0002	1.498E-02
14994.37	0.0121	0.0123	0.0136	0.0002	1.542E-02
15493.70	0.0117	0.0119	0.0138	0.0002	1.585E-02
15993.53	0.0113	0.0115	0.0140	0.0002	1.626E-02
16497.03	0.0110	0.0111	0.0142	0.0002	1.664E-02
16989.70	0.0106	0.0108	0.0144	0.0002	1.696E-02
17494.86	0.0103	0.0105	0.0147	0.0002	1.721E-02
17988.86	0.0101	0.0102	0.0149	0.0002	1.740E-02
18490.53	0.0098	0.0099	0.0151	0.0002	1.757E-02

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 4

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /261  
 OPERATOR: Geraldo Frigo  
 SAMPLE ID: GID(3) 80% FN  
 SUBMITTER: Sandra M. de Lima

LP 10:04:24 09/12/06  
 HP 11:13:11 09/12/06  
 REP 11:13:12 09/12/06

PRESSURE psia	PORE DIAMETER µm	MEAN DIAMETER µm	CUMULATIVE VOLUME mL/g	INCREMENTAL VOLUME mL/g	LOG DIFF. VOL dV/dlogD mL/g
18988.52	0.0095	0.0097	0.0153	0.0002	1.768E-02
19488.02	0.0093	0.0094	0.0155	0.0002	1.771E-02
19987.69	0.0090	0.0092	0.0157	0.0002	1.759E-02
20482.02	0.0088	0.0089	0.0159	0.0002	1.736E-02
20982.85	0.0086	0.0087	0.0161	0.0002	1.704E-02
21483.18	0.0084	0.0085	0.0163	0.0002	1.664E-02
21986.51	0.0082	0.0083	0.0164	0.0002	1.621E-02
22483.01	0.0080	0.0081	0.0166	0.0002	1.574E-02
22978.35	0.0079	0.0080	0.0168	0.0001	1.528E-02
23477.35	0.0077	0.0078	0.0169	0.0001	1.485E-02
23978.68	0.0075	0.0076	0.0170	0.0001	1.443E-02
24476.01	0.0074	0.0075	0.0171	0.0001	1.405E-02
24974.84	0.0072	0.0073	0.0172	0.0001	1.369E-02
25476.84	0.0071	0.0072	0.0173	0.0001	1.336E-02
25975.84	0.0070	0.0070	0.0175	0.0001	1.308E-02
26477.01	0.0068	0.0069	0.0176	0.0001	1.284E-02
26973.84	0.0067	0.0068	0.0177	0.0001	1.267E-02
27473.17	0.0066	0.0066	0.0178	0.0001	1.255E-02
27969.51	0.0065	0.0065	0.0179	0.0001	1.248E-02
28475.84	0.0064	0.0064	0.0179	0.0001	1.243E-02
28975.17	0.0062	0.0063	0.0181	0.0001	1.240E-02
29475.84	0.0061	0.0062	0.0181	0.0001	1.239E-02
29965.67	0.0060	0.0061	0.0182	0.0001	1.239E-02
29456.67	0.0061	0.0061	0.0182	0.0000	0.000E+00
28966.17	0.0062	0.0062	0.0182	0.0000	0.000E+00
28467.34	0.0064	0.0063	0.0182	0.0000	0.000E+00
27974.33	0.0065	0.0064	0.0182	0.0000	0.000E+00
27474.33	0.0066	0.0065	0.0182	0.0000	0.000E+00
26973.00	0.0067	0.0066	0.0182	0.0000	0.000E+00
26477.49	0.0068	0.0068	0.0182	0.0000	0.000E+00
25976.82	0.0070	0.0069	0.0182	0.0000	0.000E+00
25471.16	0.0071	0.0070	0.0182	0.0000	0.000E+00
24973.99	0.0072	0.0072	0.0182	0.0000	0.000E+00

24482.99	0.0074	0.0073	0.0182	0.0000	0.000E+00
23980.65	0.0075	0.0075	0.0182	0.0000	0.000E+00
23478.82	0.0077	0.0076	0.0182	0.0000	0.000E+00
22985.98	0.0079	0.0078	0.0182	0.0000	0.000E+00
22484.15	0.0080	0.0080	0.0182	0.0000	0.000E+00
21982.31	0.0082	0.0081	0.0182	0.0000	0.000E+00
21483.14	0.0084	0.0083	0.0182	0.0000	0.000E+00
20981.47	0.0086	0.0085	0.0182	0.0000	0.000E+00
20483.81	0.0088	0.0087	0.0182	0.0000	0.000E+00
19982.80	0.0091	0.0089	0.0182	0.0000	0.000E+00
18988.14	0.0095	0.0093	0.0182	0.0000	0.000E+00
17986.63	0.0101	0.0098	0.0182	0.0000	0.000E+00

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 5

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /261

OPERATOR: Geraldo Frigo

LP 10:04:24 09/12/06

SAMPLE ID: GID(3) 80% FN

HP 11:13:11 09/12/06

SUBMITTER: Sandra M. de Lima

REP 11:13:12 09/12/06

PRESSURE	PORE	MEAN	CUMULATIVE	INCREMENTAL	LOG DIFF.
psia	DIAMETER	DIAMETER	VOLUME	VOLUME	VOL dV/dlogD
	æm	æm	mL/g	mL/g	mL/g
16992.13	0.0106	0.0103	0.0182	0.0000	0.000E+00
15987.13	0.0113	0.0110	0.0182	0.0000	0.000E+00
14992.46	0.0121	0.0117	0.0182	0.0000	0.000E+00
13990.79	0.0129	0.0125	0.0182	0.0000	0.000E+00
12991.62	0.0139	0.0134	0.0182	0.0000	0.000E+00
11988.28	0.0151	0.0145	0.0182	0.0000	0.000E+00
10991.11	0.0165	0.0158	0.0182	0.0000	0.000E+00
9987.61	0.0181	0.0173	0.0182	0.0000	0.000E+00
8993.11	0.0201	0.0191	0.0182	0.0000	0.000E+00
7991.77	0.0226	0.0214	0.0182	0.0000	0.000E+00
6993.94	0.0259	0.0242	0.0182	0.0000	0.000E+00
5991.93	0.0302	0.0280	0.0182	0.0000	0.000E+00
4995.93	0.0362	0.0332	0.0182	0.0000	0.000E+00
3993.27	0.0453	0.0407	0.0182	0.0000	0.000E+00
2993.27	0.0604	0.0529	0.0182	0.0000	0.000E+00
1986.10	0.0911	0.0757	0.0182	0.0000	0.000E+00
1003.11	0.1803	0.1357	0.0182	0.0000	0.000E+00
904.28	0.2000	0.1902	0.0182	0.0000	0.000E+00
800.95	0.2258	0.2129	0.0182	0.0000	3.191E-04
589.45	0.3068	0.2663	0.0181	-0.0002	1.059E-03
399.95	0.4522	0.3795	0.0179	-0.0001	1.048E-03
198.96	0.9091	0.6806	0.0175	-0.0004	1.130E-03
100.46	1.8004	1.3547	0.0172	-0.0003	1.197E-03
59.63	3.0331	2.4167	0.0169	-0.0003	1.120E-03
29.47	6.1376	4.5854	0.0166	-0.0003	1.057E-03

D 6 – Dados para resistência à compressão do novo concreto com 3,5% de ar incorporado

Tabela 11 – Resistência à compressão para idade de 7 dias

<b>Resistência à compressão - 7 dias</b>		
<b>Data 04/10/2006</b>		
<b>Fcj</b>	<b>Resistência</b>	<b>Força</b>
CP1	40,36	316,8
CP2	41,89	328,8
CP3	40,59	318,6
CP4	41,13	322,9
CP5	40,70	319,5
CP6	40,88	320,9
CP7	40,43	317,4

Tabela 12 – Resistência à compressão para idade de 28 dias

<b>Resistência à compressão - 28 dias</b>		
<b>Data 25/10/2006</b>		
<b>Fcj</b>	<b>Resistência</b>	<b>Força</b>
CP1	49,15	385,8
CP2	49,03	384,9
CP3	53,26	418,1
CP4	48,71	382,4
CP5	52,37	411,1
CP6	50,13	393,5
CP7	52,92	415,4

D 7 – Dados módulo de elasticidade do novo concreto com 3,5% de ar incorporado  
Tabela 13 - Dados para o módulo de elasticidade

Módulo de Elasticidade para o Novo Concreto							
<i>Corpo-de-prova 1</i>				<i>Corpo-de-prova 2</i>			
Fck (N/mm <sup>2</sup> )	Deformação $\mu\epsilon$	Deformação mm/mm	Módulo (MPa)	Fck (N/mm <sup>2</sup> )	Deformação $\mu\epsilon$	Deformação mm/mm	Módulo (MPa)
1,27	2	0,002	63500	1,27	2	0,002	63500
2,55	5	0,005	51000	2,55	4	0,004	63750
3,82	8	0,008	47750	3,82	7	0,007	54571
5,1	11	0,011	46364	5,1	10	0,01	51000
6,37	14	0,014	45500	6,37	13	0,013	49000
7,64	16	0,016	47750	7,64	16	0,016	47750
8,92	19	0,019	46947	8,92	19	0,019	46947
10,19	22	0,022	46318	10,19	22	0,022	46318
11,46	25	0,025	45840	11,46	24	0,024	47750
12,74	28	0,028	45500	12,74	27	0,027	47185
14,01	31	0,031	45194	14,01	30	0,03	46700
15,29	34	0,034	44971	15,29	34	0,034	44971
15,56	37	0,037	42054	15,56	36	0,036	43222

Módulo de Elasticidade (GPa)

45

D 8 – Dados do ensaio de gelo/degelo do novo concreto com 3,5% de ar incorporado  
 Tabela 14 - Freqüências naturais para os ensaios de gelo/degelo do novo concreto com 3,5% de ar incorporado

<b>Ensaio de Gelo / Degelo - Novo Concreto -3,5% Ar Incorporado - 26/10/2006 a 29/12/2006</b>					
<i>Número de Ciclos (N)</i>	<i>Novo Concreto</i>				
	<i>Freqüência Natural (hz)</i>				
	<i>Gelo</i>	<i>Degelo</i>	<i>Dc (%)</i>	<i>FD (%)</i>	
1	CAD N1	1667	1600	97	3
	CAD N2	1655	1602	99	3
	CAD N3	1664	1609	99	3
	CAD N4	1630	1572	99	3
	CAD N5	1670	1616	100	3
2	CAD N1	1664	1619	100	6
	CAD N2	1670	1595	98	6
	CAD N3	1680	1606	99	6
	CAD N4	1645	1569	98	6
	CAD N5	1682	1608	99	6
3	CAD N1	1690	1615	99	9
	CAD N2	1668	1590	97	9
	CAD N3	1690	1602	98	9
	CAD N4	1680	1570	98	9
	CAD N5	1664	1607	98	9
4	CAD N1	1686	1615	99	12
	CAD N2	1657	1592	98	12
	CAD N3	1672	1602	98	12
	CAD N4	1635	1567	98	12
	CAD N5	1680	1607	98	12
5	CAD N1	1656	1589	96	15
	CAD N2	1665	1595	98	15
	CAD N3	1675	1604	99	15
	CAD N4	1641	1570	98	15
	CAD N5	1683	1606	98	15
6	CAD N1	1655	1615	99	19
	CAD N2	1662	1590	97	18
	CAD N3	1671	1601	98	18
	CAD N4	1642	1566	98	18
	CAD N5	1682	1607	98	18
7	CAD N1		1614	99	22
	CAD N2		1590	97	21
	CAD N3		1601	98	21
	CAD N4		1565	98	21
	CAD N5		1605	98	21
8	CAD N1	1665	1614	99	25
	CAD N2	1680	1593	98	24
	CAD N3	1686	1600	98	25
	CAD N4	1649	1565	98	24
	CAD N5	1696	1606	98	25

<i>Número de Ciclos (N)</i>	<i>Novo Concreto</i>				
	<i>Freqüência Natural (hz)</i>		<i>Dc (%)</i>	<i>FD (%)</i>	
	<i>Gelo</i>	<i>Degelo</i>			
9	CAD N1	1660	1590	96	27
	CAD N2	1680	1595	98	28
	CAD N3	1680	1603	98	28
	CAD N4	1650	1570	98	28
	CAD N5	1695	1607	98	28
10	CAD N1	1670	1609	98	31
	CAD N2	1677	1595	98	31
	CAD N3	1687	1600	98	31
	CAD N4	1650	1565	98	31
	CAD N5	1695	1600	98	30
11	CAD N1	1695	1614	99	34
	CAD N2	1675	1590	97	33
	CAD N3	1685	1602	98	34
	CAD N4	1655	1566	98	34
	CAD N5	1704	1610	99	34
12	CAD N1		1590	96	36
	CAD N2		1592	98	37
	CAD N3		1610	99	37
	CAD N4		1565	98	37
	CAD N5		1622	100	38
13	CAD N1		1614	99	40
	CAD N2		1588	97	39
	CAD N3		1600	98	40
	CAD N4		1564	98	40
	CAD N5		1612	99	40
14	CAD N1		1596	97	42
	CAD N2		1589	97	43
	CAD N3		1600	98	43
	CAD N4		1567	98	43
	CAD N5		1612	99	43
15	CAD N1	1662	1600	97	46
	CAD N2	1668	1590	97	46
	CAD N3	1673	1600	98	46
	CAD N4	1646	1565	98	46
	CAD N5	1683	1612	99	46
16	CAD N1	1660	1614	99	50
	CAD N2	1663	1593	98	49
	CAD N3	1673	1602	98	49
	CAD N4	1640	1566	98	49
	CAD N5	1680	1614	99	50
17	CAD N1	1644	1592	96	51
	CAD N2	1653	1591	97	52
	CAD N3	1673	1600	98	52
	CAD N4	1636	1569	98	52
	CAD N5	1683	1614	99	53
18	CAD N1	1654	1591	96	54
	CAD N2	1658	1591	97	55
	CAD N3	1670	1600	98	55
	CAD N4	1635	1569	98	55
	CAD N5	1674	1613	99	56

<i>Número de Ciclos (N)</i>	<i>Novo Concreto</i>				
	<i>Frequência Natural (hz)</i>				
	<i>Gelo</i>	<i>Degelo</i>	<i>Dc (%)</i>	<i>FD (%)</i>	
19	CAD N1	1652	1590	96	57
	CAD N2	1666	1590	97	58
	CAD N3	1673	1603	98	58
	CAD N4	1646	1569	98	58
	CAD N5	1696	1616	100	59
20	CAD N1		1591	96	60
	CAD N2		1589	97	61
	CAD N3		1604	99	62
	CAD N4		1568	98	61
	CAD N5		1610	99	62
21	CAD N1	1653	1589	96	63
	CAD N2	1655	1591	97	64
	CAD N3	1666	1599	98	64
	CAD N4	1638	1566	98	64
	CAD N5	1674	1613	99	65
22	CAD N1	1653	1583	95	65
	CAD N2	1661	1588	97	67
	CAD N3	1674	1592	97	67
	CAD N4	1641	1563	98	67
	CAD N5	1684	1609	99	68
23	CAD N1	1656	1594	97	69
	CAD N2	1660	1590	97	70
	CAD N3	1673	1600	98	70
	CAD N4	1641	1568	98	71
	CAD N5	1680	1613	99	71
24	CAD N1	1654	1590	96	72
	CAD N2	1658	1588	97	73
	CAD N3	1670	1601	98	74
	CAD N4	1629	1568	98	74
	CAD N5	1678	1611	99	74
25	CAD N1		1590	96	75
	CAD N2		1589	97	76
	CAD N3		1605	99	77
	CAD N4		1569	98	77
	CAD N5		1614	99	78
26	CAD N1	1654	1588	96	78
	CAD N2	1663	1591	97	79
	CAD N3	1674	1602	98	80
	CAD N4	1641	1568	98	80
	CAD N5	1683	1611	99	80
27	CAD N1		1592	96	81
	CAD N2		1593	98	82
	CAD N3		1600	98	83
	CAD N4		1568	98	83
	CAD N5		1613	99	84



<i>Número de Ciclos (N)</i>	<i>Novo Concreto</i>				
	<i>Frequência Natural (hz)</i>				
	<i>Gelo</i>	<i>Degelo</i>	<i>Dc (%)</i>	<i>FD (%)</i>	
28	CAD N1	1653	1589	96	84
	CAD N2	1657	1594	98	86
	CAD N3	1670	1602	98	86
	CAD N4	1635	1569	98	86
	CAD N5	1677	1613	99	87
29	CAD N1	1646	1592	96	87
	CAD N2	1669	1589	97	88
	CAD N3	1676	1600	98	89
	CAD N4	1642	1570	98	89
	CAD N5	1682	1614	99	90
30	CAD N1	1675	1589	96	90
	CAD N2	1653	1589	97	91
	CAD N3	1668	1598	98	92
	CAD N4	1630	1566	98	92
	CAD N5	1671	1612	99	93
31	CAD N1	1678	1587	96	93
	CAD N2	1565	1589	97	94
	CAD N3	1668	1600	98	95
	CAD N4	1663	1570	98	95
	CAD N5	1674	1614	99	96
32	CAD N1	1670	1592	96	96
	CAD N2	1656	1589	97	97
	CAD N3	1668	1598	98	98
	CAD N4	1655	1569	98	98
	CAD N5	1670	1612	99	99

## D 9 – Dados da porosimetria por intrusão de mercúrio do novo concreto

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /276  
 OPERATOR: Geraldo Frigo LP 09:45:18 10/24/06  
 SAMPLE ID: CAD 35% HP 10:58:11 10/24/06  
 SUBMITTER: Sandra REP 10:58:12 10/24/06

PENETROMETER NUMBER: 9206171500 ADVANCING CONTACT ANGLE: 130.0 deg  
 PENETROMETER CONSTANT: 21.63 æL/pF RECEDING CONTACT ANGLE: 130.0 deg  
 PENETROMETER WEIGHT: 66.3387 g MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm  
 STEM VOLUME: 1.1980 mL MERCURY DENSITY: 13.5335 g/mL  
 MAXIMUM HEAD PRESSURE: 4.6800 psi SAMPLE WEIGHT: 2.9616 g  
 PENETROMETER VOLUME: 4.5564 mL SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 115.1588 g

LOW PRESSURE:  
 MERCURY FILLING PRESSURE: 0.5430 psia  
 LAST LOW PRESSURE POINT: 25.0692 psia  
 HIGH PRESSURE:  
 RUN TYPE: AUTOMATIC  
 RUN METHOD: EQUILIBRATED  
 EQUILIBRATION TIME: 10 seconds

## INTRUSION DATA SUMMARY

TOTAL INTRUSION VOLUME = 0.0160 mL/g  
 TOTAL PORE AREA = 3.536 sq-m/g  
 MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) = 0.0202 æm  
 MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) = 0.0119 æm  
 AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) = 0.0181 æm  
 BULK DENSITY = 2.5359 g/mL  
 APPARENT (SKELETAL) DENSITY = 2.6428 g/mL  
 POROSITY = 4.05 %  
 STEM VOLUME USED = 4 % \*\*\*\*

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 2

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /276  
 OPERATOR: Geraldo Frigo LP 09:45:18 10/24/06  
 SAMPLE ID: CAD 35% HP 10:58:11 10/24/06  
 SUBMITTER: Sandra REP 10:58:12 10/24/06

PRESSURE psia	PORE DIAMETER æm	MEAN DIAMETER æm	CUMULATIVE VOLUME mL/g	INCREMENTAL VOLUME mL/g	LOG DIFF. VOL dV/dlogD mL/g
0.54	333.0814	333.0814	0.0000	0.0000	2.375E-03
1.10	164.7706	248.9260	0.0006	0.0006	3.775E-04
1.98	91.5608	128.1657	0.0006	0.0000	0.000E+00
2.89	62.6873	77.1241	0.0006	0.0000	0.000E+00
3.98	45.4107	54.0490	0.0006	0.0000	0.000E+00
4.84	37.3980	41.4044	0.0006	0.0000	0.000E+00
5.97	30.3131	33.8556	0.0006	0.0000	0.000E+00
6.57	27.5461	28.9296	0.0006	0.0000	0.000E+00
7.35	24.6218	26.0839	0.0006	0.0000	0.000E+00

8.03	22.5183	23.5700	0.0006	0.0000	0.000E+00
8.93	20.2436	21.3810	0.0006	0.0000	0.000E+00
9.48	19.0868	19.6652	0.0006	0.0000	0.000E+00
10.17	17.7913	18.4390	0.0006	0.0000	0.000E+00
10.88	16.6181	17.2047	0.0006	0.0000	3.146E-04
11.61	15.5845	16.1013	0.0006	0.0000	4.344E-03
12.29	14.7187	15.1516	0.0006	0.0000	8.220E-03
12.88	14.0393	14.3790	0.0006	0.0000	1.043E-02
13.43	13.4663	13.7528	0.0013	0.0006	1.151E-02
14.06	12.8667	13.1665	0.0017	0.0004	1.147E-02
14.77	12.2479	12.5573	0.0019	0.0002	9.975E-03
15.35	11.7801	12.0140	0.0020	0.0001	7.609E-03
15.97	11.3277	11.5539	0.0020	0.0001	4.474E-03
16.63	10.8774	11.1025	0.0020	0.0000	2.285E-03
17.31	10.4504	10.6639	0.0021	0.0000	1.125E-03
18.07	10.0068	10.2286	0.0021	0.0000	5.501E-04
18.90	9.5709	9.7889	0.0021	0.0000	1.838E-04
19.86	9.1089	9.3399	0.0021	0.0000	5.300E-05
20.98	8.6198	8.8643	0.0021	0.0000	0.000E+00
21.73	8.3249	8.4724	0.0021	0.0000	0.000E+00
22.66	7.9812	8.1531	0.0021	0.0000	0.000E+00
23.37	7.7392	7.8602	0.0021	0.0000	0.000E+00
24.35	7.4262	7.5827	0.0021	0.0000	0.000E+00
25.07	7.2146	7.3204	0.0021	0.0000	0.000E+00
29.99	6.0305	6.6225	0.0021	0.0000	0.000E+00
49.83	3.6300	4.8302	0.0021	0.0000	0.000E+00
69.49	2.6027	3.1163	0.0021	0.0000	0.000E+00
89.66	2.0173	2.3100	0.0021	0.0000	0.000E+00
119.49	1.5136	1.7654	0.0021	0.0000	0.000E+00
149.49	1.2099	1.3617	0.0021	0.0000	5.272E-04
200.15	0.9036	1.0567	0.0022	0.0001	5.274E-04
249.49	0.7249	0.8143	0.0022	0.0000	0.000E+00
299.99	0.6029	0.6639	0.0022	0.0000	0.000E+00
350.99	0.5153	0.5591	0.0022	0.0000	0.000E+00
399.32	0.4529	0.4841	0.0022	0.0000	3.700E-05
451.32	0.4007	0.4268	0.0022	0.0000	2.628E-04

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 3

SAMPLE  
 OPERATOR: Geraldo Frigo  
 SAMPLE ID: CAD 35%  
 SUBMITTER: Sandra

DIRECTORY/NUMBER:

DATA1 /276  
 LP 09:45:18 10/24/06  
 HP 10:58:11 10/24/06  
 REP 10:58:12 10/24/06

PRESSURE	PORE DIAMETER	MEAN DIAMETER	CUMULATIVE VOLUME	INCREMENTAL VOLUME	LOG DIFF. VOL dV/dlogD
psia	æm	æm	mL/g	mL/g	mL/g
498.16	0.3631	0.3819	0.0022	0.0000	4.402E-04
597.82	0.3025	0.3328	0.0023	0.0000	9.780E-04
697.99	0.2591	0.2808	0.0024	0.0001	1.466E-03
796.99	0.2269	0.2430	0.0025	0.0001	1.150E-03
897.65	0.2015	0.2142	0.0025	0.0000	5.853E-04
998.32	0.1812	0.1913	0.0025	0.0000	1.996E-04
1195.15	0.1513	0.1662	0.0025	0.0000	6.615E-07
1394.99	0.1297	0.1405	0.0025	0.0000	0.000E+00
1594.32	0.1134	0.1215	0.0025	0.0000	0.000E+00
1794.99	0.1008	0.1071	0.0025	0.0000	0.000E+00
1993.32	0.0907	0.0957	0.0025	0.0000	0.000E+00
2294.99	0.0788	0.0848	0.0025	0.0000	0.000E+00
2596.66	0.0697	0.0742	0.0025	0.0000	0.000E+00
2895.00	0.0625	0.0661	0.0025	0.0000	0.000E+00
3193.16	0.0566	0.0596	0.0025	0.0000	5.183E-06
3494.50	0.0518	0.0542	0.0025	0.0000	1.450E-03
3789.16	0.0477	0.0497	0.0025	0.0000	5.398E-03
4091.32	0.0442	0.0460	0.0027	0.0002	1.003E-02

4389.65	0.0412	0.0427	0.0032	0.0005	1.352E-02
4691.81	0.0385	0.0399	0.0037	0.0005	1.513E-02
4989.31	0.0363	0.0374	0.0041	0.0004	1.512E-02
5484.80	0.0330	0.0346	0.0047	0.0006	1.494E-02
5988.96	0.0302	0.0316	0.0053	0.0006	1.524E-02
6486.46	0.0279	0.0290	0.0058	0.0006	1.564E-02
6986.12	0.0259	0.0269	0.0063	0.0005	1.564E-02
7482.78	0.0242	0.0250	0.0068	0.0005	1.549E-02
7980.61	0.0227	0.0234	0.0072	0.0004	1.545E-02
8504.44	0.0213	0.0220	0.0076	0.0004	1.558E-02
9006.27	0.0201	0.0207	0.0080	0.0004	1.587E-02
9504.60	0.0190	0.0196	0.0084	0.0004	1.624E-02
10001.93	0.0181	0.0186	0.0088	0.0004	1.657E-02
10502.43	0.0172	0.0177	0.0091	0.0004	1.669E-02
11003.76	0.0164	0.0168	0.0095	0.0003	1.675E-02
11499.76	0.0157	0.0161	0.0098	0.0003	1.680E-02
11999.25	0.0151	0.0154	0.0101	0.0003	1.687E-02
12496.92	0.0145	0.0148	0.0104	0.0003	1.707E-02
12995.08	0.0139	0.0142	0.0107	0.0003	1.738E-02
13498.41	0.0134	0.0137	0.0110	0.0003	1.777E-02
13993.74	0.0129	0.0132	0.0112	0.0003	1.823E-02
14492.91	0.0125	0.0127	0.0115	0.0003	1.868E-02
14993.57	0.0121	0.0123	0.0118	0.0003	1.909E-02
15490.40	0.0117	0.0119	0.0121	0.0003	1.942E-02
15990.24	0.0113	0.0115	0.0123	0.0003	1.966E-02
16489.73	0.0110	0.0111	0.0126	0.0003	1.987E-02
16987.56	0.0106	0.0108	0.0129	0.0003	2.004E-02

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 4

SAMPLE	DIRECTORY/NUMBER:	DATA1	/276
OPERATOR: Geraldo Frigo		LP 09:45:18	10/24/06
SAMPLE ID: CAD 35%		HP 10:58:11	10/24/06
SUBMITTER: Sandra		REP 10:58:12	10/24/06

PRESSURE	PORE DIAMETER	MEAN DIAMETER	CUMULATIVE VOLUME	INCREMENTAL VOLUME	LOG DIFF.
psia	æm	æm	mL/g	mL/g	VOL dV/dlogD mL/g
17487.23	0.0103	0.0105	0.0131	0.0002	2.010E-02
17986.73	0.0101	0.0102	0.0134	0.0003	2.006E-02
18490.89	0.0098	0.0099	0.0136	0.0002	1.990E-02
18985.89	0.0095	0.0097	0.0139	0.0002	1.961E-02
19489.39	0.0093	0.0094	0.0141	0.0002	1.915E-02
19985.05	0.0090	0.0092	0.0143	0.0002	1.854E-02
20486.22	0.0088	0.0089	0.0145	0.0002	1.779E-02
20984.38	0.0086	0.0087	0.0147	0.0002	1.693E-02
21482.88	0.0084	0.0085	0.0149	0.0002	1.592E-02
21979.88	0.0082	0.0083	0.0151	0.0002	1.481E-02
22479.55	0.0080	0.0081	0.0152	0.0002	1.361E-02
22981.55	0.0079	0.0080	0.0153	0.0001	1.240E-02
23477.05	0.0077	0.0078	0.0155	0.0001	1.118E-02
23979.88	0.0075	0.0076	0.0156	0.0001	9.962E-03
24478.55	0.0074	0.0075	0.0156	0.0001	8.838E-03
24975.21	0.0072	0.0073	0.0157	0.0001	7.805E-03
25472.05	0.0071	0.0072	0.0157	0.0001	6.849E-03
25971.38	0.0070	0.0070	0.0158	0.0000	6.003E-03
26481.21	0.0068	0.0069	0.0158	0.0000	5.236E-03
26978.05	0.0067	0.0068	0.0158	0.0000	4.608E-03
27465.88	0.0066	0.0066	0.0159	0.0000	4.093E-03
27970.22	0.0065	0.0065	0.0159	0.0000	3.664E-03
28469.72	0.0064	0.0064	0.0159	0.0000	3.344E-03
28966.22	0.0062	0.0063	0.0159	0.0000	3.120E-03
29466.05	0.0061	0.0062	0.0159	0.0000	2.988E-03
29969.39	0.0060	0.0061	0.0160	0.0000	2.944E-03
29453.55	0.0061	0.0061	0.0160	0.0000	0.000E+00

28960.88	0.0062	0.0062	0.0160	0.0000	0.000E+00
28466.55	0.0064	0.0063	0.0160	0.0000	0.000E+00
27973.38	0.0065	0.0064	0.0160	0.0000	0.000E+00
27464.71	0.0066	0.0065	0.0160	0.0000	0.000E+00
26971.21	0.0067	0.0066	0.0160	0.0000	0.000E+00
26479.71	0.0068	0.0068	0.0160	0.0000	0.000E+00
25975.37	0.0070	0.0069	0.0160	0.0000	0.000E+00
25477.54	0.0071	0.0070	0.0160	0.0000	0.000E+00
24974.54	0.0072	0.0072	0.0160	0.0000	0.000E+00
24465.54	0.0074	0.0073	0.0160	0.0000	0.000E+00
23978.70	0.0075	0.0075	0.0160	0.0000	0.000E+00
23484.87	0.0077	0.0076	0.0160	0.0000	0.000E+00
22979.53	0.0079	0.0078	0.0160	0.0000	0.000E+00
22476.70	0.0080	0.0080	0.0160	0.0000	0.000E+00
21983.86	0.0082	0.0081	0.0160	0.0000	0.000E+00
21481.03	0.0084	0.0083	0.0160	0.0000	0.000E+00
20985.52	0.0086	0.0085	0.0160	0.0000	0.000E+00
20476.69	0.0088	0.0087	0.0160	0.0000	0.000E+00

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 5

SAMPLE	DIRECTORY/NUMBER:	DATA1	/276
OPERATOR: Geraldo Frigo		LP 09:45:18	10/24/06
SAMPLE ID: CAD 35%		HP 10:58:11	10/24/06
SUBMITTER: Sandra		REP 10:58:12	10/24/06

PRESSURE	PORE	MEAN	CUMULATIVE	INCREMENTAL	LOG DIFF.
psia	DIAMETER	DIAMETER	VOLUME	VOLUME	VOL dV/dlogD
	æm	æm	mL/g	mL/g	mL/g
19982.52	0.0091	0.0089	0.0160	0.0000	0.000E+00
18986.35	0.0095	0.0093	0.0160	0.0000	0.000E+00
17989.34	0.0101	0.0098	0.0160	0.0000	0.000E+00
16983.67	0.0106	0.0104	0.0160	0.0000	0.000E+00
15985.16	0.0113	0.0110	0.0160	0.0000	0.000E+00
14991.16	0.0121	0.0117	0.0160	0.0000	0.000E+00
13989.32	0.0129	0.0125	0.0160	0.0000	0.000E+00
12989.65	0.0139	0.0134	0.0160	0.0000	0.000E+00
11986.32	0.0151	0.0145	0.0160	0.0000	0.000E+00
10991.98	0.0165	0.0158	0.0160	0.0000	0.000E+00
9991.64	0.0181	0.0173	0.0160	0.0000	0.000E+00
8992.47	0.0201	0.0191	0.0160	0.0000	0.000E+00
7989.47	0.0226	0.0214	0.0160	0.0000	0.000E+00
6993.63	0.0259	0.0242	0.0160	0.0000	0.000E+00
5994.79	0.0302	0.0280	0.0160	0.0000	0.000E+00
4994.62	0.0362	0.0332	0.0160	0.0000	0.000E+00
3982.12	0.0454	0.0408	0.0160	0.0000	0.000E+00
2986.95	0.0606	0.0530	0.0160	0.0000	0.000E+00
1991.95	0.0908	0.0757	0.0160	0.0000	0.000E+00
1003.45	0.1802	0.1355	0.0160	0.0000	0.000E+00
892.29	0.2027	0.1915	0.0160	0.0000	0.000E+00
786.29	0.2300	0.2164	0.0160	0.0000	0.000E+00
602.62	0.3001	0.2651	0.0160	0.0000	0.000E+00
401.62	0.4503	0.3752	0.0160	0.0000	0.000E+00
200.63	0.9015	0.6759	0.0160	0.0000	0.000E+00
100.29	1.8033	1.3524	0.0160	0.0000	0.000E+00
59.29	3.0503	2.4268	0.0160	0.0000	0.000E+00
30.13	6.0030	4.5267	0.0160	0.0000	0.000E+00

D10 – Dados de porosimetria por intrusão de mercúrio para os concretos da terceira série de ensaios de gelo e degelo.

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /19  
 OPERATOR: Geraldo Frigo LP 10:57:00 08/02/07  
 SAMPLE ID: VAC HP 12:08:26 08/02/07  
 SUBMITTER: Sandra Lima REP 12:08:27 08/02/07

PENETROMETER NUMBER: 9206171500 ADVANCING CONTACT ANGLE: 130.0 deg  
 PENETROMETER CONSTANT: 21.63 規/pF RECEDING CONTACT ANGLE: 130.0 deg  
 PENETROMETER WEIGHT: 66.7268 g MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm  
 STEM VOLUME: 1.1980 mL MERCURY DENSITY: 13.5413 g/mL  
 MAXIMUM HEAD PRESSURE: 4.6800 psi SAMPLE WEIGHT: 1.2817 g  
 PENETROMETER VOLUME: 4.5564 mL SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 121.8877 g

## LOW PRESSURE:

MERCURY FILLING PRESSURE: 0.6032 psia  
 LAST LOW PRESSURE POINT: 25.5626 psia

## HIGH PRESSURE:

RUN TYPE: AUTOMATIC  
 RUN METHOD: EQUILIBRATED  
 EQUILIBRATION TIME: 10 seconds

## INTRUSION DATA SUMMARY

TOTAL INTRUSION VOLUME = 0.0199 mL/g  
 TOTAL PORE AREA = 6.201 sq-m/g  
 MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) = 0.0108 詢  
 MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) = 0.0079 詢  
 AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) = 0.0128 詢  
 BULK DENSITY = 2.2193 g/mL  
 APPARENT (SKELETAL) DENSITY = 2.3218 g/mL  
 POROSITY = 4.41 %  
 STEM VOLUME USED = 2 % \*\*\*\*

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 2

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /19  
 OPERATOR: Geraldo Frigo LP 10:57:00 08/02/07  
 SAMPLE ID: VAC HP 12:08:26 08/02/07  
 SUBMITTER: Sandra Lima REP 12:08:27 08/02/07

PRESSURE psia	PORE DIAMETER 詢	MEAN DIAMETER 詢	CUMULATIVE VOLUME mL/g	INCREMENTAL VOLUME mL/g	LOG DIFF. VOL dV/dlogD mL/g
0.60	299.8560	299.8560	0.0000	0.0000	4.057E-04
1.03	176.1368	237.9964	0.0001	0.0001	1.009E-03
1.68	107.5180	141.8274	0.0006	0.0005	1.617E-03

2.41	75.0055	91.2617	0.0007	0.0001	4.191E-04
3.28	55.2142	65.1098	0.0008	0.0000	4.211E-04
4.21	42.9519	49.0830	0.0008	0.0001	4.769E-04
5.10	35.4367	39.1943	0.0009	0.0000	6.243E-04
5.99	30.1942	32.8155	0.0009	0.0001	6.951E-04
6.85	26.4092	28.3017	0.0010	0.0000	6.095E-04
7.49	24.1435	25.2763	0.0010	0.0000	5.835E-04
8.12	22.2633	23.2034	0.0010	0.0001	4.844E-04
8.72	20.7364	21.4999	0.0010	0.0000	4.150E-04
9.30	19.4522	20.0943	0.0010	0.0000	3.899E-04
10.39	17.4102	18.4312	0.0010	0.0000	7.268E-04
11.40	15.8624	16.6363	0.0011	0.0001	8.250E-04
12.22	14.8024	15.3324	0.0011	0.0000	8.240E-04
13.03	13.8858	14.3441	0.0011	0.0000	7.607E-04
13.81	13.0976	13.4917	0.0011	0.0000	7.565E-04
14.70	12.3072	12.7024	0.0012	0.0001	8.811E-04
15.50	11.6678	11.9875	0.0012	0.0000	9.360E-04
16.37	11.0465	11.3572	0.0012	0.0000	9.608E-04
17.22	10.5040	10.7753	0.0012	0.0000	9.135E-04
18.11	9.9880	10.2460	0.0013	0.0000	9.701E-04
18.95	9.5446	9.7663	0.0013	0.0000	1.113E-03
19.74	9.1621	9.3533	0.0013	0.0000	1.205E-03
20.39	8.8698	9.0160	0.0013	0.0000	1.242E-03
21.18	8.5411	8.7055	0.0013	0.0000	1.357E-03
21.98	8.2296	8.3853	0.0013	0.0000	1.386E-03
22.72	7.9597	8.0946	0.0014	0.0000	1.322E-03
23.54	7.6843	7.8220	0.0014	0.0000	1.188E-03
24.25	7.4591	7.5717	0.0014	0.0000	1.042E-03
24.94	7.2529	7.3560	0.0014	0.0000	8.739E-04
25.56	7.0753	7.1641	0.0014	0.0000	6.989E-04
30.01	6.0274	6.5514	0.0014	0.0000	0.000E+00
59.67	3.0308	4.5291	0.0014	0.0000	1.964E-04
89.51	2.0207	2.5258	0.0016	0.0002	4.787E-03
119.67	1.5114	1.7660	0.0027	0.0010	4.971E-03
150.33	1.2031	1.3572	0.0028	0.0002	2.803E-03
179.66	1.0067	1.1049	0.0031	0.0003	3.726E-03
210.00	0.8613	0.9340	0.0034	0.0002	2.841E-03
249.00	0.7264	0.7938	0.0036	0.0002	4.886E-03
299.83	0.6032	0.6648	0.0042	0.0006	7.156E-03
349.99	0.5168	0.5600	0.0046	0.0004	6.755E-03
399.99	0.4522	0.4845	0.0050	0.0004	6.603E-03
449.99	0.4019	0.4271	0.0053	0.0003	6.062E-03

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 3

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /19

OPERATOR: Geraldo Frigo

LP 10:57:00 08/02/07

SAMPLE ID: VAC

HP 12:08:26 08/02/07

SUBMITTER: Sandra Lima

REP 12:08:27 08/02/07

PRESSURE	PORE DIAMETER	MEAN DIAMETER	CUMULATIVE VOLUME	INCREMENTAL VOLUME	LOG DIFF. VOL dV/dlogD
psia	詢	詢	mL/g	mL/g	mL/g
498.99	0.3625	0.3822	0.0056	0.0002	5.695E-03
599.15	0.3019	0.3322	0.0060	0.0004	4.576E-03

697.48	0.2593	0.2806	0.0063	0.0002	2.824E-03
796.65	0.2270	0.2432	0.0064	0.0001	2.305E-03
898.32	0.2013	0.2142	0.0065	0.0001	1.556E-03
997.15	0.1814	0.1914	0.0066	0.0000	6.110E-04
1145.98	0.1578	0.1696	0.0066	0.0000	1.004E-05
1297.65	0.1394	0.1486	0.0066	0.0000	0.000E+00
1444.99	0.1252	0.1323	0.0066	0.0000	0.000E+00
1595.82	0.1133	0.1193	0.0066	0.0000	0.000E+00
1747.15	0.1035	0.1084	0.0066	0.0000	0.000E+00
1895.82	0.0954	0.0995	0.0066	0.0000	0.000E+00
2196.99	0.0823	0.0889	0.0066	0.0000	0.000E+00
2496.33	0.0725	0.0774	0.0066	0.0000	0.000E+00
2795.00	0.0647	0.0686	0.0066	0.0000	0.000E+00
3094.51	0.0584	0.0616	0.0066	0.0000	0.000E+00
3396.01	0.0533	0.0559	0.0066	0.0000	0.000E+00
3790.68	0.0477	0.0505	0.0066	0.0000	0.000E+00
4190.85	0.0432	0.0454	0.0066	0.0000	0.000E+00
4588.36	0.0394	0.0413	0.0066	0.0000	0.000E+00
4989.36	0.0362	0.0378	0.0066	0.0000	0.000E+00
5485.19	0.0330	0.0346	0.0066	0.0000	0.000E+00
5985.36	0.0302	0.0316	0.0066	0.0000	0.000E+00
6484.53	0.0279	0.0291	0.0066	0.0000	0.000E+00
6984.03	0.0259	0.0269	0.0066	0.0000	0.000E+00
7485.02	0.0242	0.0250	0.0066	0.0000	0.000E+00
7983.86	0.0227	0.0234	0.0066	0.0000	0.000E+00
8504.85	0.0213	0.0220	0.0066	0.0000	0.000E+00
9002.69	0.0201	0.0207	0.0066	0.0000	0.000E+00
9502.18	0.0190	0.0196	0.0066	0.0000	0.000E+00
10005.02	0.0181	0.0186	0.0066	0.0000	0.000E+00
10506.18	0.0172	0.0176	0.0066	0.0000	9.918E-05
11004.01	0.0164	0.0168	0.0066	0.0000	2.658E-03
11501.84	0.0157	0.0161	0.0066	0.0000	7.306E-03
12000.51	0.0151	0.0154	0.0066	0.0000	1.300E-02
12500.51	0.0145	0.0148	0.0066	0.0000	1.901E-02
13005.34	0.0139	0.0142	0.0072	0.0006	2.389E-02
13500.17	0.0134	0.0137	0.0078	0.0007	2.640E-02
13998.67	0.0129	0.0132	0.0084	0.0006	2.689E-02
14496.83	0.0125	0.0127	0.0090	0.0006	2.613E-02
14995.16	0.0121	0.0123	0.0096	0.0005	2.447E-02
15993.33	0.0113	0.0117	0.0099	0.0003	2.153E-02
16989.00	0.0106	0.0110	0.0100	0.0001	2.190E-02
17989.00	0.0101	0.0104	0.0106	0.0006	2.586E-02
18981.66	0.0095	0.0098	0.0115	0.0009	3.183E-02

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 4

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /19

OPERATOR: Geraldo Frigo

LP 10:57:00 08/02/07

SAMPLE ID: VAC

HP 12:08:26 08/02/07

SUBMITTER: Sandra Lima

REP 12:08:27 08/02/07

PRESSURE	PORE	MEAN	CUMULATIVE	INCREMENTAL	LOG DIFF.
psia	DIAMETER	DIAMETER	VOLUME	VOLUME	VOL dV/dlogD
	詢	詢	mL/g	mL/g	mL/g
19986.66	0.0090	0.0093	0.0123	0.0008	3.659E-02



20983.82	0.0086	0.0088	0.0131	0.0008	3.898E-02
21982.65	0.0082	0.0084	0.0139	0.0008	4.056E-02
22981.48	0.0079	0.0080	0.0147	0.0008	4.220E-02
23974.82	0.0075	0.0077	0.0155	0.0007	4.364E-02
24975.98	0.0072	0.0074	0.0162	0.0008	4.582E-02
25971.15	0.0070	0.0071	0.0171	0.0008	4.812E-02
26971.48	0.0067	0.0068	0.0179	0.0008	4.962E-02
27968.81	0.0065	0.0066	0.0186	0.0007	5.076E-02
28963.97	0.0062	0.0064	0.0193	0.0007	5.142E-02
29463.80	0.0061	0.0062	0.0199	0.0006	5.155E-02

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /22

OPERATOR: Geraldo Frigo

LP 15:25:31 08/03/07

SAMPLE ID: RCU

HP 16:31:10 08/03/07

SUBMITTER: Sandra Lima

REP 16:31:11 08/03/07

PENETROMETER NUMBER: 9206171500	ADVANCING CONTACT ANGLE: 130.0 deg
PENETROMETER CONSTANT: 21.63 規/pF	RECEDING CONTACT ANGLE: 130.0 deg
PENETROMETER WEIGHT: 66.7293 g	MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm
STEM VOLUME: 1.1980 mL	MERCURY DENSITY: 13.5340 g/mL
MAXIMUM HEAD PRESSURE: 4.6800 psi	SAMPLE WEIGHT: 1.1624 g
PENETROMETER VOLUME: 4.5564 mL	SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 122.9935 g

## LOW PRESSURE:

MERCURY FILLING PRESSURE: 0.6037 psia

LAST LOW PRESSURE POINT: 25.2319 psia

## HIGH PRESSURE:

RUN TYPE: AUTOMATIC

RUN METHOD: EQUILIBRATED

EQUILIBRATION TIME: 10 seconds

## INTRUSION DATA SUMMARY

TOTAL INTRUSION VOLUME =	0.0131 mL/g
TOTAL PORE AREA =	2.014 sq-m/g
MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) =	0.3525 詢
MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) =	0.0082 詢
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) =	0.0260 詢
BULK DENSITY =	2.3965 g/mL
APPARENT (SKELETAL) DENSITY =	2.4742 g/mL
POROSITY =	3.14 %
STEM VOLUME USED =	1 % ****

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 2

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /22

OPERATOR: Geraldo Frigo

LP 15:25:31 08/03/07

SAMPLE ID: RCU

HP 16:31:10 08/03/07

SUBMITTER: Sandra Lima

REP 16:31:11 08/03/07

PRESSURE psia	PORE DIAMETER 詢	MEAN DIAMETER 詢	CUMULATIVE VOLUME mL/g	INCREMENTAL VOLUME mL/g	LOG DIFF. VOL dV/dlogD mL/g
0.60	299.6077	299.6077	0.0000	0.0000	1.232E-04
1.31	138.3275	218.9676	0.0000	0.0000	1.821E-04
2.13	84.8525	111.5900	0.0001	0.0001	4.928E-04
3.02	59.8092	72.3309	0.0002	0.0001	6.999E-04
4.02	45.0188	52.4140	0.0003	0.0001	4.217E-04
4.92	36.7920	40.9054	0.0003	0.0000	4.643E-04
5.72	31.6038	34.1979	0.0004	0.0001	7.940E-04
6.50	27.8087	29.7062	0.0004	0.0000	8.171E-04
7.25	24.9484	26.3785	0.0004	0.0000	1.201E-03
8.05	22.4772	23.7128	0.0005	0.0001	1.384E-03
8.98	20.1351	21.3062	0.0006	0.0000	1.194E-03
9.66	18.7245	19.4298	0.0006	0.0000	8.958E-04
10.62	17.0248	17.8747	0.0007	0.0000	7.718E-04
11.54	15.6684	16.3466	0.0007	0.0000	9.413E-04
12.51	14.4531	15.0607	0.0007	0.0000	1.221E-03
13.41	13.4828	13.9679	0.0008	0.0001	1.451E-03
14.26	12.6877	13.0853	0.0008	0.0000	1.381E-03
15.17	11.9245	12.3061	0.0008	0.0000	1.349E-03
15.88	11.3859	11.6552	0.0009	0.0000	1.378E-03
16.74	10.8058	11.0958	0.0009	0.0000	1.527E-03
17.50	10.3324	10.5691	0.0009	0.0000	1.701E-03
18.31	9.8791	10.1057	0.0010	0.0001	1.762E-03
19.09	9.4760	9.6775	0.0010	0.0000	1.986E-03
19.96	9.0622	9.2691	0.0011	0.0001	2.167E-03
20.73	8.7234	8.8928	0.0011	0.0000	2.253E-03
21.47	8.4247	8.5740	0.0011	0.0000	2.283E-03
22.21	8.1445	8.2846	0.0011	0.0000	2.229E-03
22.95	7.8812	8.0128	0.0012	0.0001	2.108E-03
23.73	7.6228	7.7520	0.0012	0.0000	1.856E-03
24.49	7.3858	7.5043	0.0012	0.0000	1.618E-03
25.23	7.1681	7.2769	0.0013	0.0000	1.392E-03
30.01	6.0272	6.5976	0.0013	0.0000	1.137E-04
59.67	3.0309	4.5290	0.0014	0.0001	5.986E-04
89.84	2.0132	2.5220	0.0015	0.0002	1.121E-03
119.51	1.5134	1.7633	0.0017	0.0002	2.185E-03
149.17	1.2125	1.3629	0.0020	0.0004	5.513E-03
179.67	1.0067	1.1096	0.0026	0.0005	6.311E-03
209.33	0.8640	0.9353	0.0030	0.0004	8.494E-03
249.83	0.7239	0.7940	0.0038	0.0008	1.130E-02
299.16	0.6046	0.6643	0.0047	0.0009	1.045E-02
349.66	0.5173	0.5609	0.0054	0.0006	8.391E-03
398.82	0.4535	0.4854	0.0058	0.0004	6.863E-03
449.15	0.4027	0.4281	0.0061	0.0003	7.034E-03
498.15	0.3631	0.3829	0.0065	0.0004	7.560E-03
599.48	0.3017	0.3324	0.0070	0.0006	5.238E-03

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /21

OPERATOR: Geraldo Frigo

LP 11:02:12 08/03/07

SAMPLE ID: VCU

HP 12:09:37 08/03/07

SUBMITTER: Sandra Lima

REP 12:09:38 08/03/07

PENETROMETER NUMBER: 9206171500      ADVANCING CONTACT ANGLE: 130.0 deg  
 PENETROMETER CONSTANT: 21.63 規/pF      RECEDING CONTACT ANGLE: 130.0 deg  
 PENETROMETER WEIGHT: 66.7253 g      MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm  
 STEM VOLUME: 1.1980 mL      MERCURY DENSITY: 13.5403 g/mL  
 MAXIMUM HEAD PRESSURE: 4.6800 psi      SAMPLE WEIGHT: 1.4574 g  
 PENETROMETER VOLUME: 4.5564 mL      SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 121.1200 g

## LOW PRESSURE:

MERCURY FILLING PRESSURE: 0.5802 psia

LAST LOW PRESSURE POINT: 25.4531 psia

## HIGH PRESSURE:

RUN TYPE: AUTOMATIC

RUN METHOD: EQUILIBRATED

EQUILIBRATION TIME: 10 seconds

## INTRUSION DATA SUMMARY

TOTAL INTRUSION VOLUME = 0.0193 mL/g  
 TOTAL PORE AREA = 4.238 sq-m/g  
 MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) = 0.0349 詢  
 MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) = 0.0079 詢  
 AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) = 0.0182 詢  
 BULK DENSITY = 2.2533 g/mL  
 APPARENT (SKELETAL) DENSITY = 2.3558 g/mL  
 POROSITY = 4.35 %  
 STEM VOLUME USED = 2 % \*\*\*\*

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 2

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /21

OPERATOR: Geraldo Frigo

LP 11:02:12 08/03/07

SAMPLE ID: VCU

HP 12:09:37 08/03/07

SUBMITTER: Sandra Lima

REP 12:09:38 08/03/07

PRESSURE psia	PORE DIAMETER 詢	MEAN DIAMETER 詢	CUMULATIVE VOLUME mL/g	INCREMENTAL VOLUME mL/g	LOG DIFF. VOL dV/dlogD mL/g
0.58	311.7435	311.7435	0.0000	0.0000	2.379E-04
1.29	140.3672	226.0554	0.0001	0.0001	2.757E-04
2.16	83.7653	112.0663	0.0002	0.0001	2.530E-04
3.25	55.6274	69.6963	0.0002	0.0000	2.936E-04
4.12	43.9113	49.7693	0.0002	0.0000	2.502E-04
5.04	35.8808	39.8960	0.0002	0.0000	2.860E-04

6.21	29.1167	32.4987	0.0003	0.0000	3.898E-04
7.31	24.7385	26.9276	0.0003	0.0000	2.975E-04
8.44	21.4331	23.0858	0.0003	0.0000	7.989E-04
9.42	19.1955	20.3143	0.0004	0.0001	6.919E-04
10.54	17.1619	18.1787	0.0004	0.0000	3.361E-04
11.51	15.7074	16.4346	0.0004	0.0000	3.124E-04
12.52	14.4429	15.0751	0.0004	0.0000	5.299E-04
13.36	13.5358	13.9893	0.0004	0.0000	6.774E-04
14.29	12.6523	13.0941	0.0005	0.0000	7.073E-04
15.27	11.8449	12.2486	0.0005	0.0000	7.911E-04
16.24	11.1353	11.4901	0.0005	0.0000	8.099E-04
17.14	10.5507	10.8430	0.0005	0.0000	7.562E-04
18.00	10.0502	10.3004	0.0005	0.0000	6.915E-04
18.93	9.5535	9.8018	0.0006	0.0000	6.472E-04
19.79	9.1387	9.3461	0.0006	0.0000	7.953E-04
20.69	8.7435	8.9411	0.0006	0.0000	9.899E-04
21.76	8.3128	8.5282	0.0006	0.0000	1.058E-03
22.71	7.9637	8.1383	0.0006	0.0000	1.086E-03
23.65	7.6474	7.8056	0.0007	0.0000	1.040E-03
24.59	7.3563	7.5019	0.0007	0.0000	9.076E-04
25.45	7.1058	7.2311	0.0007	0.0000	7.616E-04
29.84	6.0605	6.5831	0.0007	0.0000	4.444E-07
59.84	3.0223	4.5414	0.0007	0.0000	6.218E-05
89.51	2.0206	2.5215	0.0008	0.0001	9.244E-04
119.67	1.5113	1.7660	0.0010	0.0002	2.083E-03
149.17	1.2124	1.3619	0.0012	0.0002	2.237E-03
179.84	1.0057	1.1091	0.0014	0.0002	2.317E-03
210.51	0.8592	0.9324	0.0015	0.0002	2.327E-03
249.34	0.7254	0.7923	0.0017	0.0002	2.699E-03
300.34	0.6022	0.6638	0.0019	0.0003	3.613E-03
348.50	0.5190	0.5606	0.0022	0.0002	4.169E-03
399.17	0.4531	0.4860	0.0025	0.0003	4.434E-03
450.50	0.4015	0.4273	0.0027	0.0002	3.993E-03
499.50	0.3621	0.3818	0.0028	0.0001	3.909E-03
598.83	0.3020	0.3321	0.0032	0.0003	3.855E-03
696.66	0.2596	0.2808	0.0034	0.0002	4.078E-03
796.16	0.2272	0.2434	0.0037	0.0003	4.797E-03
897.16	0.2016	0.2144	0.0039	0.0002	5.101E-03
996.49	0.1815	0.1915	0.0042	0.0002	5.348E-03

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 3

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /21

OPERATOR: Geraldo Frigo

LP 11:02:12 08/03/07

SAMPLE ID: VCU

HP 12:09:37 08/03/07

SUBMITTER: Sandra Lima

REP 12:09:38 08/03/07

PRESSURE	PORE DIAMETER	MEAN DIAMETER	CUMULATIVE VOLUME	INCREMENTAL VOLUME	LOG DIFF. VOL dV/dlogD
psia	詢	詢	mL/g	mL/g	mL/g
1147.32	0.1576	0.1696	0.0045	0.0003	6.058E-03
1296.15	0.1395	0.1486	0.0048	0.0003	7.200E-03
1445.49	0.1251	0.1323	0.0052	0.0004	7.938E-03
1597.98	0.1132	0.1192	0.0056	0.0003	8.293E-03
1748.48	0.1034	0.1083	0.0059	0.0003	7.996E-03

1896.48	0.0954	0.0994	0.0062	0.0003	7.306E-03
2198.98	0.0822	0.0888	0.0066	0.0004	6.011E-03
2497.31	0.0724	0.0773	0.0069	0.0003	6.189E-03
2796.98	0.0647	0.0685	0.0072	0.0003	6.434E-03
3096.98	0.0584	0.0615	0.0075	0.0003	6.534E-03
3394.48	0.0533	0.0558	0.0078	0.0002	7.004E-03
3793.14	0.0477	0.0505	0.0081	0.0003	8.674E-03
4188.64	0.0432	0.0454	0.0086	0.0004	1.057E-02
4590.97	0.0394	0.0413	0.0090	0.0005	1.139E-02
4989.30	0.0363	0.0378	0.0095	0.0004	1.096E-02
5486.63	0.0330	0.0346	0.0099	0.0004	9.976E-03
5988.80	0.0302	0.0316	0.0102	0.0003	8.777E-03
6485.30	0.0279	0.0290	0.0106	0.0003	8.075E-03
6987.97	0.0259	0.0269	0.0108	0.0002	7.680E-03
7483.30	0.0242	0.0250	0.0110	0.0002	7.204E-03
7985.97	0.0226	0.0234	0.0112	0.0002	6.959E-03
8508.63	0.0213	0.0220	0.0114	0.0002	6.872E-03
9011.30	0.0201	0.0207	0.0115	0.0001	6.732E-03
9504.63	0.0190	0.0195	0.0117	0.0001	6.705E-03
10004.97	0.0181	0.0186	0.0119	0.0002	6.980E-03
10505.63	0.0172	0.0176	0.0120	0.0002	7.406E-03
11006.80	0.0164	0.0168	0.0121	0.0001	7.847E-03
11502.80	0.0157	0.0161	0.0123	0.0002	8.381E-03
12009.13	0.0151	0.0154	0.0124	0.0001	8.922E-03
12505.30	0.0145	0.0148	0.0126	0.0002	9.405E-03
13003.47	0.0139	0.0142	0.0128	0.0001	9.844E-03
13500.80	0.0134	0.0137	0.0130	0.0002	9.926E-03
14000.30	0.0129	0.0132	0.0131	0.0002	1.002E-02
14498.80	0.0125	0.0127	0.0133	0.0001	1.007E-02
14995.47	0.0121	0.0123	0.0135	0.0002	1.010E-02
15995.80	0.0113	0.0117	0.0137	0.0002	9.991E-03
16992.63	0.0106	0.0110	0.0140	0.0003	1.020E-02
17990.30	0.0101	0.0103	0.0142	0.0003	1.088E-02
18992.63	0.0095	0.0098	0.0144	0.0002	1.210E-02
19985.97	0.0090	0.0093	0.0147	0.0003	1.356E-02
20981.30	0.0086	0.0088	0.0150	0.0003	1.572E-02
21982.47	0.0082	0.0084	0.0154	0.0003	1.844E-02
22980.30	0.0079	0.0080	0.0157	0.0003	2.159E-02
23976.64	0.0075	0.0077	0.0161	0.0004	2.510E-02
24975.14	0.0072	0.0074	0.0166	0.0005	2.908E-02

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 4

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /21

OPERATOR: Geraldo Frigo

LP 11:02:12 08/03/07

SAMPLE ID: VCU

HP 12:09:37 08/03/07

SUBMITTER: Sandra Lima

REP 12:09:38 08/03/07

PRESSURE	PORE	MEAN	CUMULATIVE	INCREMENTAL	LOG DIFF.
psia	DIAMETER	DIAMETER	VOLUME	VOLUME	VOL dV/dlogD
	詢	詢	mL/g	mL/g	mL/g
25973.13	0.0070	0.0071	0.0171	0.0005	3.303E-02
26974.13	0.0067	0.0068	0.0176	0.0006	3.622E-02
27971.13	0.0065	0.0066	0.0183	0.0006	3.845E-02
28968.63	0.0062	0.0064	0.0189	0.0006	3.952E-02

D11 – Ensaio de resistência mecânica dos concretos submetidos à terceira série de ensaios de gelo e degelo.

Tabela 1 – Resistência à compressão axial em corpos-de-prova cilíndricos (antes do ensaio de gelo e degelo).

<b>Corpos-de-prova</b>	<b>fc<sub>7</sub></b>	<b>fc<sub>28</sub></b>
RCU		53,0
	43,4	50,9
	43,7	50,7
RAC		53,6
	43,7	53,9
	44,1	53,9
VCU		50,7
	43,5	50,7
	43,0	49,7
VAC		50,7
	42,3	50,7
	43,9	51,4
VAC		54,9
	42,0	54,9
	45,1	56,5

Tabela 3 – Módulo de elasticidade em corpos-de-prova cilíndricos - VAC (antes do ensaio de gelo e degelo).

<b>Módulo de Elasticidade</b>			
<b>Fck</b> (N/mm <sup>2</sup> )	<b>VAC</b> <b>Deformação</b> <b>μ<math>\epsilon</math></b>	<b>Deformação</b> <b>mm/mm</b>	<b>Módulo (MPa)</b>
0,00	0	0	
1,91	2	0,002	
3,82	7	0,007	
5,73	11	0,011	
7,64	15	0,015	
9,55	19	0,019	
11,46	24	0,024	43406
13,37	28	0,028	
15,28	32	0,032	
17,19	37	0,037	
19,10	41	0,041	
21,01	46	0,046	

Tabela 4 – Módulo de elasticidade em corpos-de-prova cilíndricos – VCU (antes do ensaio de gelo e degelo).

<b>Módulo de Elasticidade</b>			
<b>Fck</b> (N/mm <sup>2</sup> )	<b>VCU</b>		<b>Módulo (MPa)</b>
	<b>Deformação</b> $\mu\epsilon$	<b>Deformação</b> mm/mm	
0,00	0	0	44415
1,91	4	0,004	
3,82	8	0,008	
5,73	12	0,012	
7,64	16	0,016	
9,55	21	0,021	
11,46	25	0,025	
13,37	29	0,029	
15,28	34	0,034	
17,19	39	0,039	
19,10	43	0,043	
21,01	47	0,047	

Tabela 5 – Módulo de elasticidade em corpos-de-prova cilíndricos – RAC (antes do ensaio de gelo e degelo).

<b>Módulo de Elasticidade</b>			
<b>Fck</b> (N/mm <sup>2</sup> )	<b>RAC</b>		<b>Módulo (MPa)</b>
	<b>Deformação</b> $\mu\epsilon$	<b>Deformação</b> mm/mm	
0,00	0	0	41519
1,91	5	0,005	
3,82	9	0,009	
5,73	13	0,013	
7,64	17	0,017	
9,55	24	0,024	
11,46	27	0,027	
13,37	32	0,032	
15,28	37	0,037	
17,19	41	0,041	
19,10	46	0,046	
21,01	51	0,051	

Tabela 6 – Módulo de elasticidade em corpos-de-prova cilíndricos - RCU (antes do ensaio de gelo e degelo).

<b>Módulo de Elasticidade</b>			
<b>Fck (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>RCU</b>		<b>Módulo (MPa)</b>
	<b>Deformação <math>\mu\epsilon</math></b>	<b>Deformação mm/mm</b>	
0,00	0	0	44415
1,91	5	0,005	
3,82	9	0,009	
5,73	13	0,013	
7,64	17	0,017	
9,55	22	0,022	
11,46	26	0,026	
13,37	30	0,03	
15,28	35	0,035	
17,19	40	0,04	
19,10	44	0,044	
21,01	48	0,048	

Tabela 7 – Ensaio de resistência mecânica ( após o ensaio de gelo e degelo).

<b>Corpos-de-prova cúbicos (10 cm x 10 cm )</b>			<b>Corpos-de-prova prismáticos ( 10 cm x 10 cm x 50 cm)</b>		
<b>fc<sub>480</sub> (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>		<b>Força (KN)</b>	<b>f<sub>ct,f</sub> (MPa)</b>	
CP1	55,5	44,5	Prisma 1	10,35	4,66
CP2	56,7		Prisma 2	10,44	4,70
CP3	53,9	40,6			

\* Idade dos corpos-de-prova = 480 dias

Tabela 8 – Ensaio de absorção de água por imersão (após o ensaio de gelo e degelo).

<b>Concreto com 3,5% de ar incorporado</b>											
Idade: 318 dias											
<b>Corpo-de-prova</b>	<b>Massa inicial</b>	<b>Secagem em estufa - Massas (g)</b>					<b>Massa saturada (B)</b>	<b>hidrostática (D)</b>	<b>Absorção por imersão (0,1%)</b>	<b>índice de vazios (0,1%)</b>	<b>Massa específica real (0,01 g/cm<sup>3</sup>)</b>
		24 h	48 h	72 h	ao ar (A)						
CAD1	6095,00	6030,00	5970,00	5950,00	5960,00	6162,00	3584,00	3,4	7,8	2,51	
CAD2	5585,00	5525,00	5470,00	5460,00	5465,00	5650,00	3239,00	3,4	7,7	2,46	
CAD3	6130,00	6055,00	5995,00	5975,00	5985,00	6200,00	3608,00	3,6	8,3	2,52	
<b>Valores médios</b>								<b>3,5</b>	<b>7,9</b>	<b>2,49</b>	