

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
Pós-Graduação em Engenharia Civil

Permeabilidade ao Ar do Concreto

Valdir Moraes Pereira

Campinas
2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
Pós-Graduação em Engenharia Civil

Permeabilidade ao Ar do Concreto

Valdir Moraes Pereira

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Gladis Camarini

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Arquitetura e Construção.

Campinas, 21 de novembro de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

P414p Pereira, Valdir Moraes
 Permeabilidade ao ar do concreto / Valdir Moraes
 Pereira. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

 Orientador: Gladis Camarini.
 Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

 1. Concreto. 2. Concreto - Permeabilidade. 3.
Durabilidade (Engenharia). 4. Materiais de construção -
Durabilidade. 5. Meios Porosos - Permeabilidade. I.
Camarini, Gladis. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Air permeability of concrete

Palavras-chave em Inglês: Concrete, Concrete - Permeability, Durability
Engineering, Building materials - Durability,
Porous Media - Permeability

Área de concentração: Arquitetura e Construção

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Vitor Antônio Ducatti, João Adriano Rossignolo

Data da defesa: 21/11/2011

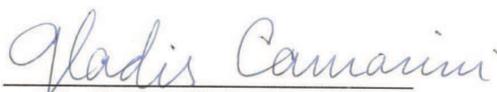
Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

PERMEABILIDADE AO AR DO CONCRETO

Valdir Moraes Pereira

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof.^a Dra. Gladis Camarini

Presidente e Orientadora / Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Vitor Antônio Ducatti
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. João Adriano Rossignolo
Universidade de São Paulo

Campinas, 21 de novembro de 2011

Agradecimentos

Nesse momento tão importante da minha vida, gostaria de agradecer a todos que participaram de forma direta ou indireta para que esse trabalho fosse concluído. Gostaria também de pedir desculpas aqueles que não estão inseridos nos agradecimentos descritos abaixo.

Primeiramente, gostaria de agradecer à Professora Dra. Gladis Camarini, por exigir sempre o melhor de mim e por ter contribuído de forma significativa no meu processo de desenvolvimento acadêmico e pessoal, assim como pela amizade, confiança e, principalmente, pela paciência.

Ao meu pai, Valter Gonçalves Pereira, pela confiança e companheirismo.

À minha mãe, Tereza de Lourdes de Moraes Pereira, por sempre estar ao meu lado nos momentos de dificuldades.

Ao meu tio, Márcio Antônio de Moraes (*in memorian*), um dos principais e estimuladores desse trabalho.

Aos meus irmãos, Vagner Gonçalves Pereira e Valmir Moraes Pereira, por todo o apoio.

À Tatiane Andrade Fonseca, minha noiva, pelo estímulo, companheirismo e paciência.

Aos meus sobrinhos, Murilo Cotrim Pereira e Matheus Cotrim Pereira.

Ao Prof. Paulo Vatavuk, professor da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo pela colaboração dada ao presente trabalho e pelo auxílio nos cálculos de mecânica dos fluidos.

A Holcim S.A, na pessoa do Engenheiro Francisco Mezzalira, pelo fornecimento de parte dos materiais.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro (Processo CNPq – 133850/2006-4).

Aos professores de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, por terem contribuído em minha formação.

A Deus por sempre estar ao meu lado, por sempre me ouvir e proteger em meus momentos de dificuldades.

Resumo

Os mecanismos de transporte no interior do concreto são os principais responsáveis pela sua deterioração. Desta maneira, a permeabilidade deste material tem vital importância e influência na sua durabilidade, ou seja, influenciando na principal característica que determina a vida útil para o qual foi projetado. É a permeabilidade que controla a taxa de ingresso e movimentação de agentes deletérios que podem comprometer física e quimicamente a estrutura interna deste material, que pode ocasionar na deterioração da sua macro e microestrutura. Por isso, diversas metodologias têm sido empregadas para mensurar e avaliar essa propriedade do concreto; no entanto, grandes disparidades têm sido encontradas. Assim, este trabalho visa avaliar permeabilidade ao ar de concretos produzidos com cimento Portland de alto-forno (CP III – 40). O traço empregado nas séries de concreto produzidas foi nas proporções de cimento: areia: brita de 1:2:3. Foram empregadas três relações água/cimento (0,42 – 0,46 e 0,50), e os concretos submetidos à dois tipos diferentes de cura (imersa e ambiente) e ensaiados aos 7 dias, 28 dias e 350 dias. A metodologia empregada para a determinação da permeabilidade ao ar do concreto foi a metodologia proposta por Thenoz. Para complementar os resultados de permeabilidade ao ar foram realizados também ensaios para determinação do índice de vazios e absorção de água por capilaridade. Os resultados indicaram que os concretos com maiores relações água/cimento têm maiores valores de índice de vazios e apresentaram os maiores valores de absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao ar. A cura imersa demonstrou ser mais eficaz do que a cura ambiente, pois os concretos submetidos a este tipo de cura foram os que obtiveram os menores valores de índice de vazios, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao ar. A idade de hidratação também influenciou nos resultados, onde idades mais avançadas também demonstraram menores valores de índice de vazios, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao ar. A análise da metodologia proposta por Thenoz para a mensuração da permeabilidade ao ar do concreto indicou que, de acordo com o número Mach, não há descompressibilidade do ar durante o ensaio. De acordo com o número Reynolds do escoamento, é possível afirmar que o escoamento durante o ensaio de permeabilidade ao ar proposto pela metodologia Thenoz ocorre sob regime laminar. De acordo com os resultados obtidos na análise fluido-dinâmica do escoamento, a metodologia Thenoz, para a mensuração da permeabilidade ao ar do concreto, mostrou-se eficaz para a determinação dessa propriedade do concreto.

Palavras chave: Concreto; Permeabilidade ao ar; Durabilidade; Metodologia de Thenoz.

Abstract

Transport mechanisms in cement-based composites are primarily responsible for their deterioration. Thus, the permeability of cement-based materials is vital in the durability of concrete, which is the main characteristic that determines the life for which they were designed. It is the permeability, which controls the rate of entry and movement of deleterious agents that can compromise physically and chemically the internal structure of these materials, causing a deterioration of its microstructure. Several methods have been employed to measure and assess the permeability of concrete, but major differences have been found. Thus, this work is to assess the air permeability of concrete produced with Portland cement, blast furnace (CP III - 40). The dash employee in the series of concrete was produced in the proportions of cement: sand: crushed of 1:2:3. Relations have been employed three water / cement (0.42 - 0.46 and 0.50), and the concrete submitted to two different types of healing (submerged and environment) and tested at 7 days, 28 days and 350 days. The methodology used to determine the permeability of concrete was to air the methodology proposed by Thenoz. To complement the results of the air permeability were also conducted tests to determine the rate of empty and absorption of water by capillary. The results indicated that the concrete relations with major water / cement have highest rate of empty and had the highest absorption of water by capillary permeability and the air. The cure immersed proved to be more effective than cure environment, because the concrete subjected to this type of cure were those who received the lowest values of voids content, absorption of water by capillary permeability and the air. The age of hydration also influenced the results, where elderly also showed lower values of voids content, absorption of water by capillary permeability and the air. The analysis of the methodology proposed by Thenoz for the measurement of the air permeability of the concrete indicated that, according to the Mach number, there is incompressibility air during the test. In accordance with the Reynolds number of outlets, it can be said that the disposal during the testing of the air permeability methodology proposed by the Thenoz occur under laminar regime. The assessment of Thenoz methodology to measure the air permeability of concrete shows that this is an effective concrete test, according to fluid-dynamics analyzes evaluate.

Keywords: Concrete; Air permeability; Durability; Thenoz methodology.

Sumário

RESUMO	xi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE QUADROS	xiv
1. Introdução	01
1.1 Objetivos	03
1.1.1 Objetivo Geral	03
1.1.2 Objetivos Específicos	03
1.2. Justificativa	04
1.3 Delimitação do tema	04
1.4 Estrutura do trabalho	05
2. Estrutura interna do concreto	07
2.1 Macro e Microestrutura do Concreto	07
2.2 Fase Agregado	09
2.3 Fase pasta no estado endurecido	10
2.4 Fase zona de transição	12
2.5 Estrutura porosa de materiais à base de cimento	14
2.6 Relações entre a porosidade, permeabilidade, durabilidade e resistência mecânica do concreto	19
2.7 Efeito da adição de escória de alto-forno na estrutura interna do concreto	20
3. Mecanismo de escoamento em meios porosos	23
3.1 Caracterização de meios porosos	24
3.2 Escoamento em meios porosos	26
3.3 Tipos de escoamento em meios porosos	33
3.4 Número Reynolds	37
3.5 Efeito da compressibilidade do fluido em escoamento em meios porosos e o número Mach	41
4. Mecanismos de transporte no concreto	43
4.1 Mecanismo de difusão iônica	43
4.1.1 Difusão iônica em estado estacionário	44
4.1.2 Difusão iônica em estado não-estacionário	46
4.1.3 Mecanismo de difusão iônica no concreto	48
4.2 Adições Minerai s	49
4.3 Mecanismo de absorção capilar	50
4.4 Permeabilidade	52
5. Permeabilidade do concreto	54
5.1 Modelo baseado na Lei de Darcy	55
5.2 Modelo de Katz-Thompson	58
5.3 Método de Figg	59

5.4 Metodologia Thenoz	63
6. Metodologia e caracterização dos materiais	68
6.1 Materiais	68
6.1.1 Cimento Portland	69
6.1.2 Agregados	69
6.2 Misturas experimentais	70
6.3 Moldagem e cura do concreto	71
6.3.1 Cura ambiente (AMB)	72
6.3.2 Cura imersa (IM)	73
6.4 Ensaio realizados	73
6.4.1 Resistência à compressão axial	74
6.4.2 Índice de vazios	74
6.4.3 Absorção de água por capilaridade	75
6.4.4 Permeabilidade ao ar	76
6.5 Quadro de resumo	78
7. Apresentação dos resultados e análises	79
7.1 Propriedades dos concretos	79
7.1.1 Resistência à compressão axial	79
7.1.2 Índice de vazios	82
7.1.3 Absorção de água por capilaridade	83
7.1.4 Relação entre resistência à compressão e absorção de água por capilaridade.....	86
7.1.5 Relação entre absorção de água por capilaridade e índice de vazios.....	87
7.1.6 Permeabilidade ao ar	88
7.1.7 Relação entre permeabilidade ao ar e resistência à compressão	92
7.1.8 Relação entre índice de vazios e permeabilidade ao ar.....	93
7.1.9 Relação entre absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao ar.	94
7.2 Mecanismo de escoamento no ensaio de permeabilidade ao ar do concreto número Mach, número Reynolds e cálculo da diferença de pressão.....	95
7.2.1 Velocidade do escoamento	95
7.2.2 Variação de pressão	100
7.2.2.1 Número Mach do escoamento	100
7.2.2.2 Cálculo teórico da diferença de pressão no ensaio de permeabilidade ao ar do concreto	102
7.2.3 Número Reynolds do escoamento	105
8. Conclusões	111
8.1 Índice de vazios	111
8.2 Coeficiente de absorção de água por capilaridade	112
8.3 Mecanismo de escoamento	112
8.4 Velocidade de escoamento de ar	112
8.5 Número Mach	113
8.6 Número Reynolds	113
8.7 Permeabilidade ao ar	113

8.8 Sugestões para prosseguimento da pesquisa	114
Referências	115
APÊNDICE A – Porcentagens retidas acumuladas do agregado miúdo	127
APÊNDICE B – Granulometria do agregado graúdo	128
APÊNDICE C – Estudo de dosagem	129
APÊNDICE D – Consumo de cimento	131
APÊNDICE E – Gráficos dos valores de absorção de água por capilaridade sem as curvas de tendência (Idade: 7 dias, 28 dias e 350 dias)	134

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Esquema ilustrativo das propriedades dos elementos constituintes do concreto (SILVA, 1995)	08
Figura 2.2 – Representação esquemática da zona de transição e da matriz de pasta de cimento no concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2008)	13
Figura 2.3 – Intervalo dimensional de sólidos e poros em uma pasta de cimento endurecida (MEHTA E MONTEIRO, 2008)	16
Figura 2.4 – Variação da porosidade capilar com diferentes relações água/cimento na quantidade de produtos de hidratação e poros capilares da pasta de cimento (adaptado de MEHTA & MONTEIRO, 2008)	17
Figura 2.5 – Variação dos produtos de hidratação, cimento anidro e poros capilares em função do grau de hidratação e idade da pasta de cimento (adaptado de MEHTA & MONTEIRO, 2008)	18
Figura 3.1 – Tipos de porosidade (FRANCISS, 1980)	26
Figura 3.2 – Verificação da validade da lei de Darcy em escoamentos de meios porosos (CAMARINI, <i>et al.</i> , 2008)	31
Figura 3.3 – Escoamento em regime laminar através de meio poroso (KATZ <i>et al.</i> , 1959 <i>apud</i> VIEIRA, 1990)	34
Figura 3.4 – Escoamento em regime de transição através de meio poroso (KATZ <i>et al.</i> , 1959 <i>apud</i> VIEIRA, 1990)	35
Figura 3.5 – Escoamento em regime turbulento através de meio poroso (KATZ <i>et al.</i> , 1959 VIEIRA, 1990)	35
Figura 3.6 – Influência da velocidade nos tipos de escoamento em meios porosos (FIROOZABADI & KATZ, 1979)	36
Figura 4.1 – Difusão em estado estacionário em uma placa de metal (CALLISTER, 2002).....	44
Figura 4.2 – Perfil de concentração de espécies difusíveis (CALLISTER, 2002).....	46
Figura 5.1 – Esquema do aparato empregado por Darcy para determinação da permeabilidade de meios porosos (LISBOA, 2001).....	56
Figura 5.2 – Desenho esquemático do método Figg para determinação da permeabilidade do concreto (SUGIYAMA <i>et al.</i> , 1996)	60
Figura. 5.3 – Aparelho de ensaio de permeabilidade ao ar – Método de Thenoz (FERREIRA Jr., 2003)	64
Figura 6.1 – Distribuição granulométrica dos agregados	70
Figura 6.2 – Aparelho de ensaio de absorção de água por capilaridade	75
Figura 6.3 – Preparação das amostras para o ensaio de permeabilidade ao ar.....	76
Figura 6.4 – Aparelho de ensaio de permeabilidade ao ar (FERREIRA Jr., 2003) – Método de Thenoz	77
Figura 7.1 – Influência do tipo de cura na resistência à compressão axial do concreto.....	80
Figura 7.2 – Influência da relação água/cimento, cura e idade na resistência à compressão do concreto.....	80

Figura 7.3 – Influência da relação água/cimento, tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.....	83
Figura 7.4 – Influência do tipo de cura, idade e relação água/cimento na absorção de água por capilaridade do concreto aos 7 dias de idade	84
Figura 7.5 – Influência do tipo de cura, idade e relação água/cimento na absorção de água por capilaridade do concreto aos 28 dias de idade	85
Figura 7.6 – Influência do tipo de cura, idade e relação água/cimento na absorção de água por capilaridade do concreto aos 350 dias de idade	85
Figura 7.7 – Relação entre resistência à compressão e absorção de água por capilaridade.....	86
Figura 7.8 – Relação entre índice de vazios e absorção de água por capilaridade	87
Figura 7.9 – Relação entre índice de vazios e absorção de água por capilaridade das amostras ensaiadas aos 7, 28 e 350 dias	88
Figura 7.10 – Permeabilidade ao ar do concreto	89
Figura 7.11 – Relação entre resistência à compressão axial e permeabilidade ao ar do concreto	92
Figura 7.12 – Correlação entre índice de vazios e permeabilidade ao ar do concreto.....	93
Figura 7.13 – Correlação entre absorção capilar e permeabilidade ao ar do concreto.....	94
Figura 7.14 – Velocidade média do escoamento	96
Figura 7.15 – Velocidade média do escoamento no interior dos poros	97
Figura 7.16 – Velocidade média do escoamento no interior dos poros	99
Figura 7.17 – Número Mach do escoamento	101
Figura 7.18 – Número Mach do escoamento no interior dos poros	101
Figura 7.19 – Número Mach do escoamento nos poros	102
Figura 7.20 – Esquema ilustrativo da variação de pressão durante o ensaio de permeabilidade ao ar do concreto	103
Figura 7.21 – Número Reynolds do escoamento	107
Figura 7.22 – Número Reynolds do escoamento - interior dos poros	108
Figura 7.23 – Número Reynolds do escoamento – poros	109

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Medidas de porosidade por vários métodos – Pastas de cimento curadas a 35 °C a 90 dias de idade (FELDMAN, 1988)	17
Tabela 5.1 – Resultados de permeabilidade medidos experimentalmente e calculado por meio do modelo Katz-Thompson (adaptado TUMIDAJSKI & LIN, 1998)	59
Tabela 5.2 – Grupo de amostras 1-2: dimensão máxima do agregado de 8 mm (adaptado PIHLAJAVAARA & PAROLL, 1975)	62
Tabela 5.3 – Grupo de amostras 3-4: dimensão máxima do agregado de 32 mm (adaptado PIHLAJAVAARA & PAROLL, 1975)	63
Tabela 5.4 – Permeabilidade <i>versus</i> o tipo de cura (BODIN E ZAHARIEVA, 2002) .	66
Tabela 7.1 – Conversão de unidades dos resultados de permeabilidade ao ar para Darcy, milidarcy (μ Darcy) e cm/s (permeabilidade hidráulica)	91

Lista de Quadros

Quadro 2.1 – Vazios da pasta de cimento (Neville, 1982)	14
Quadro 3.1 – Caracterização do escoamento em função do número Reynolds	39
Quadro 5.1 – Classificação de materiais à base de cimento em função da permeabilidade (SUGUYAMA <i>et al</i> , 1996)	61
Quadro 6.1 – Propriedades físicas do cimento Portland (CP III – 40)	69
Quadro 6.2 Propriedades físicas dos agregados	69
Quadro 6.3 – Especificação dos materiais utilizados no trabalho experimental	71
Quadro 6.4 – Séries de Concreto produzidas	72
Quadro 6.5 – Quantidade de amostras utilizadas para cada ensaio	73
Quadro 6.6 – Quadro de resumo da quantidade de amostras e nomenclatura empregada no trabalho experimental	78

1

Introdução

A permeabilidade do concreto tem sido descrita como o principal fator que pode influenciar na sua durabilidade e também na vida útil para o qual foi projetado, pois agentes agressivos, tais como íons cloreto, íons sulfatos, dióxido de carbono e outros agentes deletérios podem migrar do meio externo para o interior do concreto e interagir com seus compostos químicos hidratados, ocasionando reações químicas, deteriorações físico/químicas, fazendo assim com que sua microestrutura e desempenho possam ser comprometidos (GARBOCZI, 1990; VERDIER *et al.*, 2002).

Diversos fatores, tais como, geometria, dimensão e forma dos poros, como também, capilaridade, taxa de umidade e ambiente de exposição podem influenciar diretamente nas propriedades funcionais do concreto, estabelecendo a sua maior ou menor durabilidade (ROY, 1989).

Agentes deletérios presentes no ambiente de exposição do concreto são os principais responsáveis pelos seus mecanismos de degradação. Íons sulfato e íons cloreto provenientes de ambientes industriais e de ambientes marinhos podem penetrar no interior da sua estrutura porosa e reagir quimicamente, ocasionando reações expansivas e corrosão da armadura do concreto armado. Já o ingresso de dióxido de carbono ocasiona o fenômeno da carbonatação do hidróxido de cálcio presente no interior da pasta de cimento do concreto, originando o carbonato de cálcio, gerando também reações expansivas que podem produzir microfissuras, aumentando ainda ciclicamente a permeabilidade do material (COUTO *et al.*, 2003).

Como exposto, a permeabilidade do concreto pode ser considerada o principal fator que influencia na sua durabilidade, por isso tem sido incessantemente estudada, de forma a se encontrar uma metodologia adequada para que possa ser medida. Dentro desse contexto,

várias metodologias e equacionamentos matemáticos têm sido empregados para determinar a permeabilidade do concreto; no entanto, as discrepâncias encontradas entre os resultados obtidos dificultam a sua comparação e análise. A determinação da permeabilidade do concreto a gases é uma das avaliações que tem gerado resultados mais ambíguos e discrepantes, pois não há normas nacionais e internacionais para a realização desse tipo de ensaio, o que também tem ocasionado grandes divergências entre os resultados da comunidade científica nacional e internacional (OLIVER & MASSAT, 1992). No âmbito científico, têm-se observado também poucas pesquisas sobre esse assunto, o que dificulta ainda mais o progresso para a elaboração dos métodos eficazes para a determinação da permeabilidade do concreto. Os trabalhos atuais realizados sobre esse tema são embasados, na maioria dos casos, em pesquisas realizadas na década de 1980 e 1990, comprovando o baixo interesse da comunidade científica diante de uma propriedade tão importante do concreto.

Dentre as metodologias empregadas, como por exemplo, o método de Figg, método de Thenoz e modelo de Katz-Thompson. Para se determinar a permeabilidade ao ar há o método de Thenoz, o qual foi desenvolvido para determinar a permeabilidade ao ar de rochas e tem demonstrado bons resultados quando empregado em compósitos à base de cimento. A metodologia proposta por Thenoz (1969) consiste em determinar a permeabilidade do material por meio da passagem do ar em uma amostra desse material. Esse ensaio assemelha-se ao ensaio de permeabilidade ao ar em material pulverulento desenvolvido por Blaine, bastante utilizado para medir a finura do cimento. No caso do aparelho de Thenoz, o material é sólido (argamassa ou concreto) e o líquido manométrico é a água.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a permeabilidade ao ar do concreto preparado com cimento Portland de alto forno (CP III – 40), em função da relação água/cimento, da idade de hidratação e do tipo de cura (cura imersa e cura ambiente), por meio do ensaio de permeabilidade ao ar, de acordo com o modelo de ensaio proposto por Thenoz (1969).

1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir os objetivos propostos foi necessário:

a) revisar a literatura abordando aspectos da estrutura interna do concreto, do mecanismo de escoamento em meios porosos, mecanismo de transporte no concreto e os aspectos pertinentes à sua permeabilidade.

b) produzir concretos com diferentes relações água/cimento (0,42, 0,46 e 0,50) e dois tipos de cura (imersa e ambiente), ensaiados aos 7 dias, 28 dias e 350 dias de idade.

c) realizar ensaios para determinar a resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade e índice de vazios, assim como a permeabilidade ao ar do concreto.

d) analisar o mecanismo de transporte por meio de análises fluido-dinâmicas (número Mach e número Reynolds) avaliando a metodologia de Thenoz, empregada para determinar a permeabilidade ao ar do concreto.

1.2 Justificativa

A permeabilidade do concreto é o principal parâmetro que caracteriza a sua durabilidade. Dessa forma, métodos que possam determinar essa propriedade tornam-se cada vez mais importantes e significativos. A determinação da permeabilidade ao ar possui diversas vantagens se comparada à determinação da permeabilidade do concreto a outros fluidos. Isto porque resulta em valores de permeabilidade mais confiáveis devido às propriedades físicas e químicas do ar não interagirem com os compostos hidratados da pasta de cimento presentes no concreto, como acontece, por exemplo, quando se determina a permeabilidade à água.

Discrepâncias em resultados de ensaios foram encontradas quando se trata da medição da permeabilidade do concreto. Tendo em vista o número elevado de técnicas e metodologias adotadas para determinar essa propriedade do concreto, tanto no meio técnico, quanto no meio científico, este trabalho tem o intuito de gerar resultados de permeabilidade ao ar do concreto empregando um equipamento simples, de fácil manuseio e cujos resultados têm demonstrado eficácia. Além disso, têm-se a proposta de avaliar o método Thenoz para medir a permeabilidade ao ar do concreto, para que esse possa tornar-se um ensaio corrente nos laboratórios nacionais.

1.3 Delimitação do tema

O presente trabalho tem o objetivo de avaliar a metodologia Thenoz como forma de medir a permeabilidade ao ar do concreto, assim como avaliar a eficiência e a confiabilidade da metodologia.

1.4 Estrutura do trabalho

O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, onde foram descritas as considerações iniciais da pesquisa, assim como os seus objetivos, sua justificativa e delimitações.

No Capítulo 2 foi realizado um levantamento bibliográfico sobre a estrutura interna do concreto. Abordou-se, também, a sua estrutura porosa e a influência desses poros nas propriedades de transporte de massa em seu interior.

No Capítulo 3 foram discutidos aspectos relevantes sobre o escoamento em meios porosos e realizou-se um levantamento bibliográfico do comportamento fluido-dinâmico em ensaios de permeabilidade de meios porosos. Efetuou-se também, a caracterização de meios porosos e a abordagem dos principais equacionamentos empregados para a determinação da sua permeabilidade. Neste capítulo foram também introduzidos os conceitos do número Mach, que tem a função de avaliar a compressibilidade do fluido durante ensaios de permeabilidade. Foi introduzido também o conceito do Número Reynolds, cujo qual possui a função caracterizar o tipo de escoamento do fluido: laminar ou turbulento.

O Capítulo 4 relata a discussão dos conceitos pertinentes ao transporte de massa no interior do concreto. Neste contexto, foram abordados conceitos de difusão iônica e mecanismos de absorção de água por capilaridade.

No Capítulo 5 foram abordados aspectos relativos à permeabilidade do concreto, tais como metodologias empregadas, formas de determinação e resultados obtidos em trabalhos realizados sobre o assunto.

O Capítulo 6 descreve o programa experimental, como os ensaios de caracterização dos materiais, os métodos empregados para a realização dos ensaios de absorção de água por capilaridade, porosidade, permeabilidade ao ar do concreto e de resistência à compressão axial.

No Capítulo 7 são apresentados e discutidos os resultados obtidos no trabalho experimental. Foram analisados os resultados de porosidade, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao ar do concreto. Foram analisados também os resultados do número Mach e número Reynolds do mecanismo de escoamento do ensaio de permeabilidade ao ar.

Por fim, no Capítulo 8, são apresentadas as conclusões da influência da relação água/cimento, tipo de cura e idade de hidratação do concreto no índice de vazios, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao ar do concreto. Também são apresentadas conclusões sobre a avaliação da metodologia utilizada no ensaio de permeabilidade ao ar do concreto e as sugestões para prosseguimento da pesquisa.

2

Estrutura interna do concreto

A compreensão da microestrutura de qualquer material constitui a essência das relações existentes entre a sua estrutura-propriedade. A estrutura do concreto é heterogênea e complexa, fazendo com que as relações entre a sua estrutura e propriedade sejam difíceis de serem estabelecidas. Entretanto, o conhecimento mais aprofundado de cada material constituinte do concreto e domínio sobre as relações estrutura-propriedade de cada um desses materiais pode ser útil para que seja exercido um maior controle sobre seu comportamento. Outro motivo importante para que a estrutura interna de compósitos seja melhor compreendida, deve-se ao relacionamento entre a sua microestrutura, desempenho mecânico e vida útil (BÁGEL & ZIVICA, 1997).

Desta forma, neste capítulo são abordadas características macro e microscópicas da estrutura interna do concreto, assim como as fases que o constituem. São abordados também conceitos teóricos da estrutura porosa de compósitos à base de cimento e as relações existentes entre sua porosidade, permeabilidade, durabilidade e resistência mecânica.

2.1 Macro e microestrutura do concreto

O tipo, quantidade, tamanho, forma e a distribuição das fases presentes em um compósito são as características que determinam suas peculiaridades macro e microscópicas, fazendo com que, por meio da determinação e avaliação dessas características, torne-se possível a determinação e previsão de seu comportamento.

As características macro e microestruturais do concreto são diretamente influenciadas pelas propriedades de seus constituintes: pela proporção de cada um de seus elementos, pela quantidade de água empregada em sua mistura, pela composição e finura do cimento utilizado, pela quantidade, tipo, granulometria e impurezas dos agregados presentes,

conforme pode ser observado no esquema ilustrativo mostrado na Figura 2.1 (SILVA, 1995; DIWEDI *et al.*, 2008).

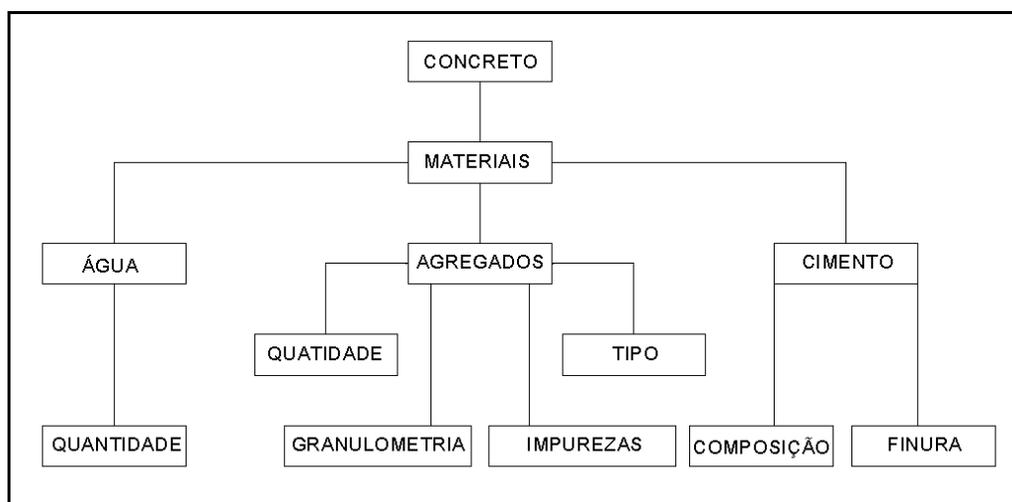


Figura 2.1 – Esquema ilustrativo das propriedades dos elementos constituintes do concreto (SILVA, 1995).

Analisando macroscopicamente o concreto no estado endurecido, duas fases podem ser facilmente visualizadas e distinguidas: fase agregados e fase pasta de cimento, também denominada matriz.

- **Fase agregados:** é constituída por diversas partículas de agregados de tamanho, formas e origem diferentes, que contribuem para a formação do concreto como material (KENNET, SNYDER & GARBOCZI, 1994).

- **Matriz:** trata-se de uma fase do concreto que pode ser descrita como o meio ligante (ligação dos agregados), que é composta por uma matriz contínua de pasta de cimento endurecida (RAMESH, SOTELINO & SHEN, 1998).

No entanto, microscopicamente, outras fases podem ser observadas no concreto, sendo mais importante aquela presente na pasta de cimento endurecida. Essa fase é constituída pela fase silicato, fase hidróxido de cálcio e fase sulfoaluminato (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Ainda microscopicamente, outra fase importante pode ser facilmente visualizada na pasta de cimento, a denominada zona de transição (interface pasta-agregado). Essa fase

encontra-se localizada na interface existente entre a pasta de cimento e o agregado, diferenciando-se das demais por possuir uma maior porosidade e concentração de cristais de hidróxido de cálcio. Essa fase possui grande importância na resistência mecânica do concreto, pois quando submetido a esforços, tais como, de compressão e tração na flexão, é nessa região que são ocasionadas o início de fissuras, que com aumento das tensões, podem ocasionar a ruptura do concreto. Esse comportamento ocorre devido a maior porosidade e menor resistência à compressão dessa região (KENNET, SNYDER & GARBOCZI, 1994).

Cada uma das fases do concreto (fase agregado; fase pasta no estado endurecido e fase zona de transição) são descritas mais detalhadamente como segue abaixo.

2.2 Fase agregado

Os agregados constituintes do concreto são considerados como inertes, ou seja, não interagem quimicamente com a água e com os compostos químicos presentes no cimento. Os agregados são considerados somente como materiais de enchimento do concreto, por serem mais baratos que os aglomerantes (cimento), que, por conseguinte, reduz o custo de obtenção do concreto (METHA & MONTEIRO, 2008).

As principais características dos agregados importantes à tecnologia do concreto são: sua porosidade, sua composição granulométrica, absorção de água, forma geométrica, textura superficial, resistência à compressão, módulo de elasticidade e tipos de substâncias orgânicas presentes. Essas características são, praticamente, todas dependentes de sua origem mineralógica e da rocha matriz da qual foi originado (que incluem os processos geológicos e de formação da rocha), das condições de exposição às quais a rocha foi submetida antes de gerar o agregado e dos tipos de equipamentos usados para a sua produção (SCRIVENER, 1989).

A fase agregado do concreto é a principal responsável pela sua massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional. Estas propriedades dependem da densidade e resistência de seus agregados constituintes, que são determinadas mais por suas características físicas do que por suas características químicas (NEVILLE, 1982). Os

agregados também podem influenciar de forma significativa na trabalhabilidade do concreto no estado fresco, assim como em suas propriedades no estado endurecido, como, resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade (SCRIVENER, 1989).

Já a porosidade, a forma e a textura dos agregados podem influenciar nas propriedades do concreto no estado endurecido, pois quanto maior o tamanho do agregado e mais elevada a proporção de partículas chatas e alongadas, maior será a tendência da água se acumular próximo à sua superfície, aumentando a porosidade da pasta de cimento localizada nesta área. Este fenômeno é denominado exsudação interna e ocasiona a maior porosidade existente na zona de transição (interface pasta – agregado graúdo) (METHA & MONTEIRO, 2008).

2.3 Fase pasta no estado endurecido

A estrutura da pasta de cimento consiste essencialmente de interações resultantes de reações químicas entre os minerais do cimento Portland e a água, gerando compostos hidratados. Microscopicamente, as fases da pasta de concreto no estado endurecido consistem de sólidos hidratados em diferentes proporções de silicato de cálcio, hidróxido de cálcio e sulfoaluminatos cálcio, assim como grãos de clínquer não hidratados - grãos anidros (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A fase silicato de cálcio da pasta de cimento Portland no estado endurecido consiste de produtos de hidratação do silicato tricálcio (C_3S) e silicato dicálcio (C_2S) que formam o mesmo produto de hidratação, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Essa fase constitui cerca de 50 a 60% do volume de sólidos da pasta de cimento completamente hidratada e dá origem à principal fase responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica e durabilidade das argamassas e concretos (CAMARINI, 1995).

A fase de hidróxido de cálcio é constituída, microscopicamente, de cristais de hidróxido de cálcio que constitui cerca de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta hidratada. A fase de hidróxido de cálcio possui características morfológicas na forma de grandes cristais em formato de prismas hexagonais distintos. A forma dos cristais é bastante

variada, apresentando desde formas quase amorfas, assim como formas de pilhas de placas geometricamente bem definidas. A presença de grandes quantidades de hidróxido de cálcio no interior da pasta de cimento hidratada apresenta efeitos desfavoráveis sobre a resistência mecânica e resistência química a soluções ácidas, pois o grau de solubilidade do hidróxido de cálcio é maior do que a solubilidade da fase C-S-H (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A fase dos sulfoaluminatos de cálcio hidratados, também denominada fase intersticial, é constituída pela hidratação do aluminato de cálcio (C_3A) e ferroaluminato de tetracálcio (C_4AF). Essa fase tem importância significativa nas reações de hidratação e ganho de resistências nas primeiras idades do concreto, pois o C_3A tem uma velocidade de reação mais rápida, se comparado aos outros compostos ativos do cimento Portland. Os sulfoaluminatos ocupam, cerca de, 15 a 20% do volume de sólidos da pasta de cimento no estado endurecido e, dessa maneira, possui papel menos importante na relação estrutura-propriedade, devido ao seu menor percentual às das demais fases (CAMARINI, 1995; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

No interior pasta de cimento no estado endurecido presente na estrutura do concreto há também a presença de grãos de clínquer não-hidratados, isto é, grãos anidros, os quais podem ser originários da ausência de espaços vazios para que hidratação do clínquer ocorra ou grãos anidros originados também devido às partículas do cimento possuírem diferentes tamanhos e as maiores partículas não conseguirem se dissolver totalmente durante o processo de hidratação do cimento (mecanismo de hidratação por dissolução-precipitação) (SCRIVINER, 1989).

Geralmente, as partículas de clínquer (matéria prima do cimento) possuem dimensões aproximadas de 1 a 50 μm e com o decorrer da hidratação, primeiramente as menores partículas são dissolvidas, enquanto as partículas maiores tornam-se menores, no entanto, com o decorrer das reações de hidratação, começam a faltar espaços vazios para as partículas maiores se dissolverem totalmente e, posteriormente, reagirem quimicamente, resultando em grãos anidros cristalizados no interior da pasta de cimento. Dessa maneira, com o decorrer do tempo e a falta de espaço disponível para que as reações químicas ocorram e sejam formados novos produtos hidratados, a hidratação das partículas fica

comprometida e resulta na formação de produtos de hidratação muito densos e com morfologia semelhante a uma partícula de clínquer (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Apesar das distintas fases e complexas estruturas morfológicas presentes na matriz da pasta de cimento, as suas características micro-estruturais não são difíceis de serem determinadas e seu entendimento pode ser embasado na compreensão dos mecanismos de hidratação do cimento, assim como nas interações sinérgicas existentes entre as diversas fases presentes (SCRIVENER, 1989).

2.4 Fase zona de transição

A interface existente entre a matriz de pasta de cimento e os agregados é denominada zona de transição. Essa fase da estrutura interna do concreto é caracterizada como uma região de menor resistência mecânica e maior porosidade. Por essa razão, o concreto possui uma tendência de ruptura com resistências mais baixas do que a resistência de seus outros dois principais constituintes (fase matriz e fase agregados), pois a zona de transição possui estrutura porosa e características distintas das demais fases do concreto, quando comparada com a porosidade da pasta de cimento sem a presença de agregados (WINSLOW & LIU, 1989).

A zona de transição no concreto é ocasionada em função da formação de uma película de água ao redor das partículas dos agregados graúdos, acarretando uma maior relação água/cimento nessa região. Assim, devido à alta relação água/cimento, os produtos cristalinos são maiores, formando uma região com maior porosidade capilar, fator de empacotamento diferenciado e maior concentração de hidróxido de cálcio, a qual é circundada por uma camada de C-S-H (MEHTA & MONTEIRO, 2008; KJELLSSEN *et al.*, 1998; NEVILLE, 1982; SCRIVENER, 1989; DIAMOND, 1999).

Com relação à morfologia, a zona de transição é caracterizada por cristais de hidróxido de cálcio orientados no sentido da superfície do agregado e por uma grande quantidade de etringita, a qual se estende a, aproximadamente, 50 μm em direção à pasta de cimento (SCRIVENER, 1989).

Estudos indicam que a largura da zona de transição pode variar entre 30 e 50 μm e que a principal característica que a determina é o empacotamento dos compostos hidratados do cimento na superfície de contato com o agregado. A zona de transição explica o fato da porosidade de argamassas e concretos não terem as mesmas características porosas e mecânicas (WINSLOW & LIU, 1989).

Na Figura 2.2 é apresentada uma ilustração microestrutural do concreto.

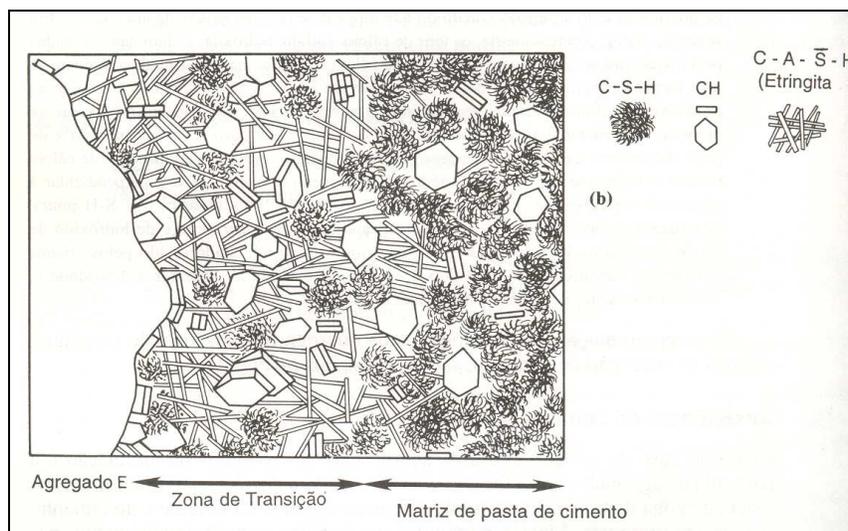


Figura 2.2 – Representação esquemática da zona de transição e da matriz de pasta de cimento no concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Na Figura 2.2 é possível observar uma maior concentração de hidróxido de cálcio próximo à superfície do agregado e também uma maior quantidade de etringita, ilustrando o que foi comentado anteriormente. Essa região tem porosidade elevada e à medida que a distância da superfície do agregado aumenta, começam a aparecer silicatos de cálcio hidratados e a porosidade começa, assim, a diminuir.

2.5 Estrutura porosa de materiais à base de cimento

A principal característica que determina a resistência mecânica do concreto pode ser determinada como sendo a sua porosidade. No entanto, a porosidade da pasta de cimento é

influenciada por inúmeras outras propriedades, podendo ser devido às características intrínsecas de seus elementos constituintes, como também das características de produção, tais como, relação água/cimento, composição mineralógica do cimento empregado, adições minerais, tipo de cura empregada e grau de hidratação (SILVA & LIBÓRIO, 1999).

Os poros presentes no interior de concretos e de argamassas encontram-se distribuídos de forma aleatória e podem ser ou não interconectados. No entanto, a definição da estrutura porosa do concreto pode ser caracterizada pela somatória total de sua porosidade, a qual influencia diretamente sobre o seu desempenho mecânico e sua vida útil. Com relação à durabilidade, é importante salientar que somente os poros interconectados, isto é, a porosidade capilar, que pode fazer com que concretos possam ser menos ou mais duráveis.

Também a respeito à durabilidade, isto é, a capacidade que o concreto possui de resistir às várias formas e mecanismos de deterioração provenientes de seu meio externo e/ou de reações químicas não desejáveis de seus constituintes, o estudo da porosidade tem a função de analisar os meios pelos quais agentes deletérios conseguem penetrar no interior do concreto e, por conseguinte, comprometer a estabilidade física e química de sua microestrutura (BROWN & SHI, 1989).

Os vazios presentes na pasta de cimento são compostos de forma variada e complexa. Esses vazios podem ser classificados como espaço interlamelar do C-S-H, vazios capilares e vazios de ar incorporado (METHA & MONTEIRO, 2008). E segundo Neville (1982), esses vazios podem ser classificados em função de suas dimensões (Quadro 2.1).

Tipos de vazios	Faixa de variação das dimensões
Espaço interlamelar do C-S-H	0,001 – 0,01 μm
Vazios capilares	0,01 – 1 μm
ar incorporado	100 μm – 1 mm
ar aprisionado	1 mm – 10 mm

Quadro 2.1 – Vazios da pasta de cimento (NEVILLE, 1982).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), os espaços vazios presentes na estrutura interna do concreto também podem ser classificados em função de suas dimensões, como pode ser observado a seguir:

- Poros de gel: diâmetro que variam entre 1 *nm* e 5*nm*;
- Poros capilares: diâmetros de 5 *nm* a 30 μ m;
- Pequenas bolhas de ar incorporado; com diâmetros de 30 μ m a 1mm; e
- Grandes bolhas de ar: com diâmetros maiores ou iguais a 1 mm.

No concreto, os poros também podem ser classificados de acordo com a sua origem ou em função dos efeitos na sua resistência ou permeabilidade, como pode ser observado a seguir (BROWN & SHI, 1989; SILVA 1995).

- Poros do gel ou poros da fase silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (poros da matriz da pasta de cimento);
 - Pequenos poros capilares (poros da zona de transição);
 - Grandes poros capilares (poros existentes devido à evaporação de água do concreto durante a hidratação);
 - Grandes vazios (que podem ser em função de ar incorporado);
 - Porosidade da zona de transição localizada na interface entre a pasta de cimento e agregados presentes no concreto no estado endurecido;
 - Fissuras proporcionadas pela instabilidade dimensional do concreto no estado endurecido; e
 - Porosidade dos agregados.

O espaço vazio interlamelar do C-S-H é responsável por 28% da porosidade capilar no concreto e segundo Powers (1962 *apud* MEHTA & MONTEIRO, 2008), os vazios interlamelares possuem a largura de, aproximadamente, 1,8 *nm*. No entanto, esse tipo de vazio na pasta endurecida é muito pequeno para ter efeito desfavorável sobre a sua resistência mecânica e durabilidade.

Os vazios capilares representam o espaço não preenchido pelos sólidos da pasta de cimento. Em pastas de cimento bem hidratadas, os vazios capilares podem variar de 10 a 50 μ m. Em pastas com relação água/cimento elevada e nas primeiras idades de hidratação, os vazios capilares podem atingir dimensões de 3 a 5 μ m. O melhor método para a avaliação das características porosas da pasta de cimento, tais como distribuição dos poros e

porosidade capilar, é a avaliação dos poros maiores que 50 nm, os quais são denominados macroporos. Os macroporos poros influenciam de maneira significativa as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. Os vazios menores que 50 nm são importantes na retração por secagem e fluência.

A Figura 2.3 ilustra de forma escalar os vazios presentes na pasta de cimento endurecida, onde é possível observar desde os menores poros (vazios interlamelares da fase C-S-H) até os maiores vazios, isto é, os proporcionados pelo ar aprisionado.

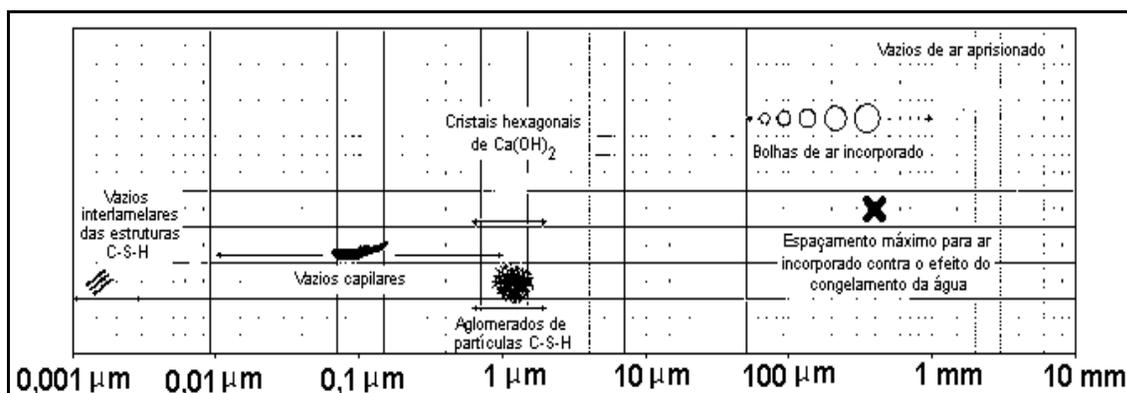


Figura 2.3 – Intervalo dimensional de sólidos e poros em uma pasta de cimento endurecida (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A estrutura porosa e área superficial dos poros do concreto são os fatores mais importantes que controlam suas propriedades (FELDMAN, 1988). Feldman (1988) apresenta valores da porosidade do concreto com diferentes métodos de medição; porosidade à água, ao álcool, ao metanol, ao propano a ao mercúrio (Tabela 2.1).

Os dados apresentados na Tabela 2.1 indicam que o valor da porosidade aumenta com o aumento da relação água/cimento, independentemente do método empregado. Na Tabela 2.1 também é possível observar que a porosidade do material pode variar em função do fluido empregado, pois a viscosidade do fluido que determina a quantidade de poros preenchidos e quanto menor a viscosidade do fluido, maior é a quantidade de poros de menores dimensões preenchidos (FELDMAN, 1988).

Tabela 2.1 – Medidas de porosidade por vários métodos – Pastas de cimento curadas a 35 °C aos 90 dias de idade (FELDMAN, 1988).

Porosidade										
a/c	Porosidade a água	Porosidade a álcool	Porosidade a metanol	Porosidade a propano	Porosidade a mercúrio					
Cimento Portland										
0,3	33	↓	18	↓	37	↓	32	↓	18	↓
0,47	46	↓	33	↓	54	↓	45	↓	29	↓
0,71	59	↓	47	↓	67	↓	63	↓	46	↓
30% de Cinza Volante										
0,3	37	↓	18	↓	41	↓	53	↓	25	↓
0,47	50	↓	29	↓	50	↓	57	↓	39	↓
0,71	63	↓	46	↓	56	↓	56	↓	50	↓

No que diz respeito ao volume total de poros da pasta de cimento em função da relação água/cimento, é possível observar, por meio da Figura 2.4, que o volume de produtos de hidratação é maior quando a relação a/c diminui. Nesse caso, os vazios capilares diminuem de 37% para 11% quando a relação água/cimento é diminuída de 0,7 para 0,4.

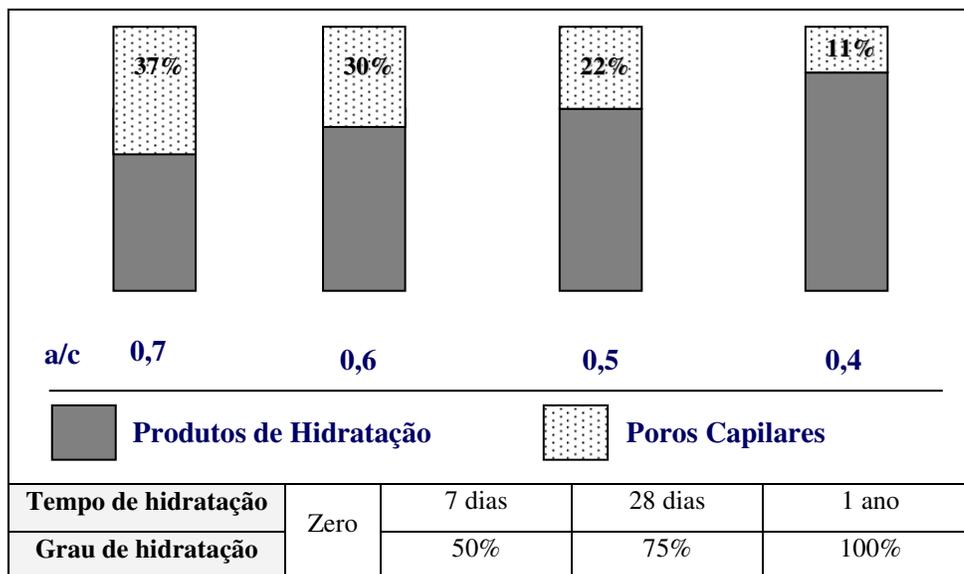


Figura 2.4 – Variação da porosidade capilar com diferentes relações água/cimento (adaptado de MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Com relação à idade e o grau de hidratação, a quantidade de poros capilares na pasta de cimento também é modificada quando essas propriedades são alteradas (Figura 2.5). É possível observar na Figura 2.5 que o aumento do grau de hidratação do concreto proporciona o aumento da quantidade de produtos de hidratação também, que, por conseguinte, faz com que a quantidade de poros capilares diminua. Da mesma forma, é

possível observar que quando a relação água/cimento é constante e igual a 0,63, com o decorrer do tempo de hidratação há uma diminuição dos grãos anidros, no entanto, os poros capilares permanecem.

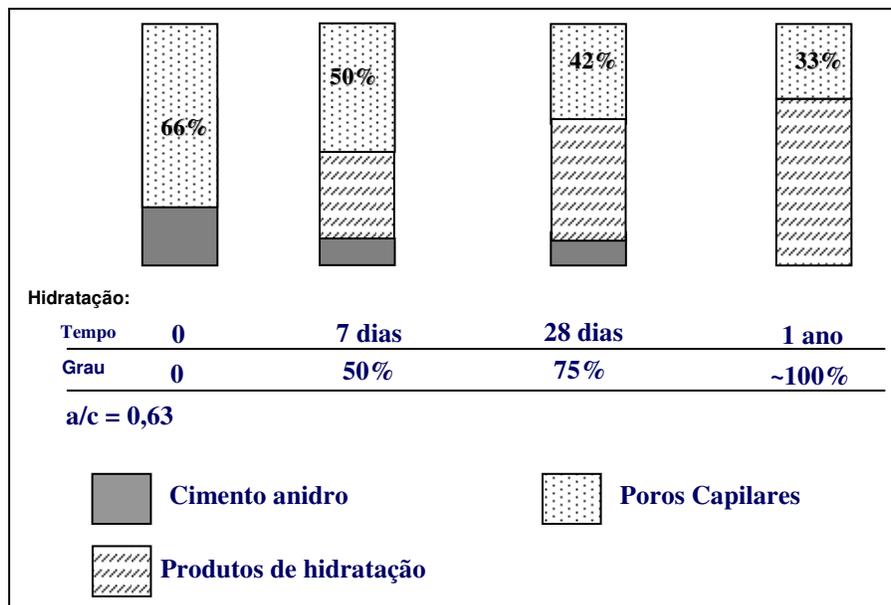


Figura 2.5 – Variação dos produtos de hidratação, cimento anidro e poros capilares em função do grau de hidratação e idade da pasta de cimento (adaptado de MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Por meio das Figuras 2.3 e 2.4 é possível concluir que diversos fatores podem influenciar na estrutura porosa do concreto, sendo considerados os principais, a relação água/cimento, a idade e grau de hidratação do concreto, assim como o tamanho e distribuição dos poros.

2.6 Relações entre a porosidade, permeabilidade, durabilidade e resistência mecânica do concreto

Mesmo a porosidade sendo a principal responsável pela maioria das propriedades das pastas, argamassas e concretos no estado endurecido, somente os poros com diâmetros

entre 10 *nm* a 100 *nm* influenciam diretamente na sua durabilidade e resistência mecânica (ODLER & RÖBLER, 1985; BROWN & SHI, 1989).

Com respeito à permeabilidade, é a sua porosidade capilar (poros interconectados) que determina a taxa de ingresso e movimentação de agentes agressivos para o interior do concreto, tais como íons cloreto e sulfatos, dióxido de carbono, fazendo com que sua vida útil possa ser influenciada e até comprometida.

A durabilidade de materiais à base de cimento está estritamente correlacionada com a sua estrutura porosa. A porosidade capilar e conseqüentemente, a permeabilidade desses materiais que irá determinar o ingresso dos agentes agressivos que poderão comprometer a sua integridade química e física.

Da mesma forma que a permeabilidade e a durabilidade do concreto têm sido correlacionadas com a sua porosidade, outras relações também têm sido realizadas, tais como permeabilidade *versus* resistência mecânica e porosidade *versus* absorção de água por capilaridade. O objetivo dessas pesquisas, tais como as realizadas por Roy (1989), Bágel & Zivica (1997) e Chidiac *et al.* (2003) é encontrar correlações existentes entre essas propriedades do concreto.

Quando se relaciona a permeabilidade do concreto com a sua resistência mecânica, os resultados indicam claramente que concretos com maiores resistências possuem menores coeficientes de permeabilidade (PIHLAJAVAARA & PAROLL, 1975).

O relacionamento entre porosidade *versus* resistência mecânica do concreto é estudado há vários anos e tem como principal objetivo avaliar qual é a influência do diâmetro e da distribuição dos poros na sua resistência mecânica. Diversos estudos realizados mostraram uma relação restrita entre porosidade e a resistência mecânica do concreto, assim como essa relação pode ser considerada como linear (ODLER & RÖBLER, 1985).

Estudos têm demonstrado uma correlação matemática linear que pode descrever a resistência mecânica do concreto em função de sua porosidade, conforme pode ser observado na Equação 2.5 (ZADRAZIL *et al.*, 2004).

$$S = S(P) \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde:

S = resistência à compressão axial; e

P = porosidade.

A Equação 2.5 é considerada como a hipótese de que a porosidade do concreto é o fator principal que influencia na sua resistência mecânica, sendo obtida considerando as alterações no concreto proporcionadas pelas modificações ocasionadas pela variação da relação água/cimento (ZADRAZIL *et al.*, 2004). A hipótese estabelecida na Equação 2.5 pode ser corretamente considerada como válida segundo estudos realizados por Zadzrazil *et al.*, (2004).

2.7 Efeito da adição de escória de alto-forno na estrutura interna do concreto

As adições minerais realizadas ao cimento Portland, como escória granulada de alto-forno, cinzas volantes, materiais carbonáticos e sílica ativa são realizadas para que se obtenham melhores propriedades de pastas, argamassas e concretos. Por meio dessas adições é possível conseguir melhor trabalhabilidade da pasta no estado fresco, menor retração por secagem, maiores resistências mecânicas e maior durabilidade do concreto. Por meio de mudanças físicas e químicas proporcionadas pelas adições minerais, algumas modificações, como, por exemplo, refinamento do tamanho do grão e refinamento do

tamanho do poro, tornando maior a durabilidade e resistência mecânica do concreto, assim como diminuindo sua porosidade, permeabilidade e absorção de água (RAO, 2003).

A adição mineral de escória de alto-forno na fabricação dos cimentos gera os denominados CP II – E e CP III, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 5735 e NBR 11578 (ABNT, 1991), os quais são classificados em função da porcentagem de escória de alto forno adicionada ao cimento. A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT estabelece as porcentagens dos dois tipos de cimentos com adição de escória granulada de alto-forno fabricados no Brasil:

- Cimento Portland Composto (CP II E): com adição de escória de alto forno que pode variar de 6 a 34 %, em massa (NBR 5735) (ABNT, 1990);
- Cimento Portland de alto (CP III): com adição de escória de alto-forno que possui porcentagem de escória entre 35 a 70 % (NBR 11578) (ABNT, 1991).

A escória de alto-forno é um resíduo derivado da indústria siderúrgica, proveniente do processo de separação das impurezas contidas no minério de ferro. Ela é composta pela combinação da ganga do minério de ferro, da cinza do coque, do calcário e dolomito, utilizados como fundentes no alto-forno. Esse resíduo quando bruscamente resfriado e moído apresenta propriedades hidráulicas latentes e quando se hidrata tem a capacidade de formar o mesmo composto responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica do concreto, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o que o torna uma adição com propriedades interessantes e eficazes quando adicionado ao cimento Portland (CAMARINI, 1995).

Os principais compostos químicos presentes na escória de alto-forno são o óxido de cálcio (CaO), dióxido de silício (SiO₂) e o trióxido de alumínio (Al₂O₃), conteúdo também, em menores quantidades, óxido de magnésio (MgO), o óxido de ferro (FeO) e ainda alguns sulfatos, tais como sulfato de cálcio (CaSO₄), sulfato de manganês (MnSO₄) e sulfato de ferro (FeSO₄) (FU *et al.*, 2000).

Estudos visando analisar o comportamento da escória de alto-forno têm demonstrado que esta ocasiona mudanças significativas nas propriedades finais de cimentos hidratados e em suas reações de hidratação, gerando, desta forma, concretos com melhores características mecânicas e com maiores durabilidades (CAMARINI, 1995; SCHUTER, 1998). Embora a escória de alto forno proporcione os mesmos produtos de hidratação que os demais concretos sem essa adição, é importante salientar que a cinética e velocidade de reação para que o C-S-H seja formado são diferentes e mais lentas do que a formação de C-S-H proveniente da hidratação do clínquer. Devido a baixa velocidade de reação química, melhorias na resistência mecânica, diminuição da porosidade e permeabilidade de argamassas e concreto são obtidos somente quando são avaliadas em idades avançadas (após 28 dias) (ESCALANTE *et al.*, 2001).

O mecanismo de reação de cimentos com adição de escória granulada de alto-forno inicia-se, primeiramente com a formação do C-S-H gel e etringita, originados da hidratação dos compostos potenciais do clínquer, liberando Ca(OH)_2 . Desta forma, o Ca(OH)_2 liberado mantém um valor apropriado de pH da solução para que a escória seja ativada e também reage com todos os íons da escória formando novos produtos de hidratação, ou seja, C-S-H. O consumo de Ca(OH)_2 e conseqüente formação de C-S-H proporciona a diminuição de composto presentes no interior da pasta de cimento com baixas resistências mecânicas e com alta solubilidade, ocasionando um maior fator de empacotamento da pasta, aumentando assim a resistência mecânica e durabilidade do concreto (FU *et al.*, 2000).

A adição da escória de alto forno ao cimento é importante não somente por proporcionar melhores propriedades, mas também por trazer benefícios econômicos, isto porque tem menor custo de obtenção do que a produção do clínquer.

3

Mecanismo de escoamento em meios porosos

O estudo de escoamento em meios porosos tem sido realizado por diversas áreas da ciência, como na engenharia do petróleo e engenharia geotécnica, por exemplo. O interesse por esse estudo se deve à busca por meios e resultados que possam melhor explicar e medir a permeabilidade de meios porosos, assim como analisar o comportamento fluido-dinâmico durante a realização desse tipo de ensaio.

Na engenharia de petróleo, o estudo de escoamento em meios porosos tem se desenvolvido principalmente na área de exploração de reservas petrolíferas subterrâneas. Essas pesquisas têm se fundamentado na análise da permeabilidade de rochas, onde há exploração de poços de gases, pois há intensa movimentação destes fluidos (petróleo e gases naturais) nas reservas exploradas (VIEIRA, 1990).

Na engenharia geotécnica, a grande maioria das pesquisas tem procurado descrever o comportamento de fluidos através de meios porosos não consolidados, como, por exemplo, o comportamento da permeabilidade e percolação de fluidos nos solos, para que se possa descrever, por exemplo, as linhas de fluxo de água em barragens e em obras enterradas (VIEIRA, 1990).

Devido ao grande interesse pela descrição e análise do comportamento de escoamento em meios porosos, diversas metodologias e formulações matemáticas têm sido empregadas. No entanto, devido às diversas velocidades e vazões do fluido no interior do meio permeante, às características porosas do meio permeável e à grande variedade de materiais analisados, diversas disparidades nos resultados têm sido encontradas nesses tipos de pesquisas. Essas disparidades podem ser ocasionadas devido a diferentes formas e possibilidades de escoamento de fluidos em meios porosos, pois há grandes variedades de meios porosos e fluidos permeantes, o que pode modificar completamente a análise e resultados em função do método e da formulação matemática utilizada (VIEIRA, 1990).

Dessa maneira, este capítulo tem o objetivo de descrever a caracterização de meios porosos, assim como abordar alguns dos métodos mais importantes empregados para a determinação da permeabilidade e análise do comportamento fluido-dinâmico em meios porosos, abordando, nesse contexto, o número Reynolds e o número Mach.

3.1 Caracterização de meios porosos

Define-se meio poroso como um corpo sólido que contém vazios ou poros que podem estar interconectados ou não, e distribuídos de maneira randômica ou de forma ordenada. Dessa forma, os meios porosos podem ser caracterizados em função da continuidade e interligação dos poros comunicáveis, da forma dos poros, assim como de suas dimensões e de sua origem (FRANCISS, 1980).

Quando o meio possui poros não interconectados e esses não formam canais de fluxo, o meio poroso é denominado como impermeável. No entanto, quando os poros formam canais interconectados, que possuem a capacidade de gerar um determinado fluxo, o meio poroso é dito como sendo permeável. Sendo o grau de permeabilidade diretamente relacionado com a sua porosidade e suas características físicas (ZORZETTO, 1991).

Segundo Franciss (1980), os meios porosos podem ser classificados não somente pelas suas características porosas, mas também pelo teor de água retida em seu interior. Entende-se como água retida aquela que possui apenas interações físicas com as partículas do meio poroso, e água livre aquela que não possui nenhum tipo de interação física ou química com o meio, estando livre para se movimentar de acordo com diferenciais de pressão entre o ambiente e o meio permeável.

Franciss (1980) caracteriza os meios porosos da seguinte maneira:

- **Meios porosos impermeáveis:** poros assinalados por canais interrompidos e que não proporcionam canais de fluxo de fluidos;

▪ **Meios com porosidade intersticial praticamente impermeáveis:** possuem alto percentual de água retida;

▪ **Meios com porosidade intersticial permeáveis:** são caracterizados por baixos percentuais de água retida e podem ser classificados em duas subclasses:

- capilar: dimensão dos vazios de 10^{-4} a 10^{-2} mm; e

- normal: dimensão dos vazios de 10^{-2} a 10^2 mm.

▪ **Meios com porosidade de fraturas permeáveis:** possuem fraturas interseccionadas;

▪ **Meios com porosidade de canais permeáveis:** possuem canais que podem gerar fluxo de fluido através de seu interior.

Ainda, segundo Franciss (1980), os meios porosos também podem ser classificados em:

- Meios homogêneos e isotrópicos;
- Meios homogêneos e anisotrópicos; e
- Meios heterogêneos.

Os meios porosos homogêneos e isotrópicos são aqueles em que a porosidade não varia sensivelmente de acordo com a posição do elemento no espaço, isto é, a porosidade volumétrica assume valores sensivelmente iguais à sua porosidade planar e porosidade linear (FRANCISS, 1980).

Os meios homogêneos e anisotrópicos são caracterizados por uma variação da sua porosidade planar (n_p) e linear (n_L), onde cada uma delas variam significativamente de acordo com a posição do elemento no espaço.

A Figura 3.1 ilustra os tipos de porosidade, volumétrica, porosidade planar e porosidade linear.

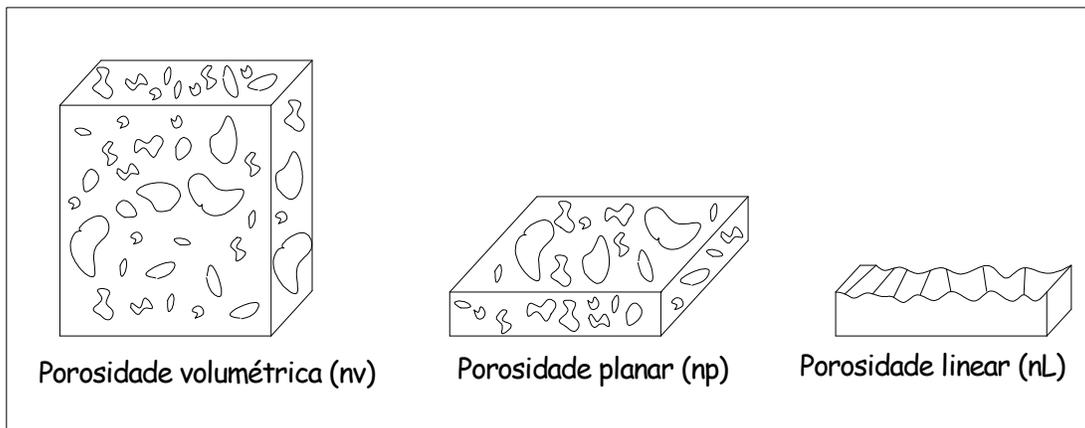


Figura 3.1 – Tipos de porosidade (FRANCISS, 1980).

Os meios porosos heterogêneos apresentam variações da porosidade linear, planar e volumétrica de acordo com a variação do elemento no espaço. Dessa forma, a porosidade do material em um dado sentido admite valores diferentes quanto é medida em outros sentidos do elemento.

No trabalho experimental realizado nessa pesquisa, a permeabilidade ao ar do concreto será medida uniaxialmente, não sendo considerada a anisotropia do material, pois os valores obtidos e avaliados serão válidos somente na direção medida.

3.2 Escoamento em meios porosos

A maioria das formulações matemáticas empregadas para a obtenção do valor da permeabilidade em meios porosos utiliza o conceito desenvolvido por Darcy. Em 1856, Darcy, após ter estudado escoamentos em condutos, dirigiu seus estudos no sentido de analisar a movimentação de água em tubos verticais preenchidos com areia. Em seus trabalhos experimentais, concluiu que a vazão era diretamente proporcional à perda de energia ao longo da amostra e à permeabilidade intrínseca do material (k), e inversamente proporcional à altura da coluna de areia (LISBOA, 2000).

As equações 3.1, 3.2 e 3.3 representam esse estudo de Darcy (GILLES, 1967).

$$Q = \frac{KA(h_1 - h_2)}{dL} = -KA \frac{dh}{dL} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

$$h = z + \left(\frac{p}{\gamma} \right) + \text{constante arbitrária} \quad \text{Equação 3.2}$$

$$K = k \left(\frac{\gamma}{\mu} \right) \quad \text{Equação 3.3}$$

Nas equações 3.1, 3.2 e 3.3, tem-se: Q é a vazão do escoamento, K é a condutividade hidráulica, A é a área de secção transversal da amostra, h é a energia por unidade de peso, L corresponde à altura da amostra ou altura da coluna de areia, z a elevação acima de um dado ponto em relação a um plano horizontal arbitrário, p é a pressão exercida pelo fluido, μ é a viscosidade dinâmica do fluido e k , a permeabilidade intrínseca do meio poroso, γ é o peso específico do fluido. A *constante arbitrária*, presente na Equação 3.2, está relacionada ao meio poroso e ao fluido empregado para a determinação da permeabilidade do meio.

A análise da lei de Darcy também pode ser realizada por meio da equação de Bernoulli na forma diferencial. A equação de Bernoulli é empregada para medir a perda de carga em um determinado escoamento. Neste caso considera-se o escoamento como sendo unidimensional em um tubo qualquer e o fluido como sendo real e incompressível (fluido newtoniano).

Fluidos reais são aqueles que satisfazem as condições de viscosidade nula e quando os componentes da velocidade do escoamento não exibem variações de grandeza na direção perpendicular ao componente da velocidade considerada $dy/dx=0$. Como não existem fluidos com viscosidades nulas, a simplificação da ausência de forças viscosas no movimento do fluido simplifica o seu tratamento matemático e proporciona solução ao equacionamento proposto. Fluidos compressíveis são aqueles em que os fenômenos ocasionados pela variação de sua massa específica devem ser considerados

matematicamente durante o seu movimento. Fluidos incompressíveis são os que não possuem variações da massa específica durante o escoamento (VENNARD & STREET, 1961).

Assim, de acordo com as considerações realizadas, a equação de Bernoulli se apresenta conforme pode ser observado na Equação 3.4:

$$d\left(\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z\right) = -dh_l \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde :

P = Pressão (N/m^2);

γ = peso específico (N/m^3);

V = velocidade (m/s);

g = aceleração da gravidade ($9,8 m/s^2$);

dh = perda de carga;

z = altura total (m).

Considerando que a velocidade do escoamento seja demasiadamente pequena, o que geralmente acontece em escoamento através de meios porosos, de forma que termo $d\left(\frac{V^2}{2g}\right)$ possa ser desprezado, a perda de carga (dh_l) é dada por:

$$dh_l = \frac{1}{k} V dl \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

dl = comprimento infinitesimal do tubo;

k = constante intrínseca de permeabilidade.

Dessa forma, a equação de Bernoulli (Equação 3.4) se reduz na Equação 3.6 e, consecutivamente, na Equação 3.7:

$$d\left(\frac{P}{\gamma} + z\right) = -\frac{1}{k}V \cdot dl \quad \text{Equação 3.6}$$

ou

$$V = -\frac{d}{dl} \cdot k \left(\frac{P}{\gamma} + z\right) \quad \text{Equação 3.7}$$

Dessa maneira, de acordo com as considerações realizadas, a equação de Bernoulli pode ser empregada na mesma forma que a equação de Darcy (Equação 3.7).

A lei de Darcy pode ser analisada também por meio da derivação do equilíbrio de forças exercidas no fluido que escoar através de um volume elementar microscópico. A resistência exercida a algum objeto imerso em um escoamento é composta por dois tipos de tensões: uma tensão de cisalhamento que age tangencialmente à superfície do objeto, e uma tensão normal (pressão), que é imposta perpendicularmente à superfície do mesmo. Assim, a resistência oferecida a este objeto é composta pela somatória das componentes das forças atuantes na superfície total do objeto. O conhecimento dessas tensões pode ser facilmente obtido em escoamentos laminares de fluidos em tubos; no entanto, em meios porosos, devido à geometria complexa dos poros, a quantificação das tensões torna-se mais difícil, cuja solução é demasiadamente complexa (RUMER Jr., 1969).

Apesar da lei de Darcy ser utilizada na maioria dos trabalhos para a determinação da permeabilidade e análises fluido-dinâmicas de meios porosos, o seu uso deve ser ponderado e cauteloso, pois em sua formulação matemática, Darcy considerou somente os fenômenos de perda de energia durante o escoamento, proporcionados pela viscosidade do fluido, o que resulta na obtenção da constante de permeabilidade denominada *Darcyniana*, ou seja, valor que representa os efeitos viscosos do escoamento – atrito e interações existentes entre o fluido e meio poroso não são consideradas (SALOMÃO *et al.*, 1999).

Os efeitos viscosos existentes entre o fluido e o meio durante o escoamento também proporciona uma perda de energia e, conseqüente, queda de pressão, a qual não está mensurada e incluída na formulação matemática desenvolvida por Darcy. Essa perda de energia pode ocorrer durante o escoamento porque pode haver contato entre partículas, e contato entre as partículas e as paredes dos poros do meio (WIEST, 1969).

Não obstante, em alguns tipos de escoamento, pode haver também queda de pressão gerada por uma perda de energia cinética provocada por aumentos da velocidade do escoamento. Essa perda de energia pode causar turbulência no escoamento, acarretando na transformação de energia cinética em energia de pressão. Essa transformação torna inválida a lei de Darcy para determinação da permeabilidade de meios porosos quando o escoamento ocorre em altas velocidades, pois não consegue descrever com exatidão esse tipo de perda de pressão (INNOCENTINI & PANDOLFELLI, 1999; TELLES & MASSARANI, 1972).

A perda de energia cinética durante o escoamento pode estar associada a fatores intrínsecos do meio, como pelo aumento da turbulência proporcionada pela variação das dimensões dos canais permeáveis responsáveis pelo fluxo do fluido. Pode também estar associada às propriedades do fluido durante o escoamento, ou seja, pela sua viscosidade, assim como pela dificuldade que é imposta ao fluido para atravessar os poros interligados do meio, sendo essa dificuldade denominada tortuosidade. A tortuosidade dos canais permeáveis está relacionada com a dimensão e geometria dos poros interligados do meio e podem ocasionar variações no regime de escoamento, mesmo em baixas velocidades (INNOCENTINI *et al.*, 2002).

Devido às perdas de energia ocasionadas no sistema poderem comprometer a validade da medição da permeabilidade em meios porosos, quando ocorrem dúvidas sobre a validade dos resultados, pode-se fazer uma análise da comprovação da lei de Darcy. Essa análise pode ser realizada a partir de várias medições do escoamento em diferentes pressões. Os resultados obtidos colocados em um gráfico da vazão *versus* queda de pressão devem gerar uma reta que passa sobre a origem do sistema cartesiano conforme ilustrado na Figura 3.2 (DULLIEN, 1992; CAMARINI *et al.*, 2008). No entanto, algumas vezes a dispersão dos

pontos força a reta a não passar pela origem do sistema. Caso isso aconteça, a lei de Darcy não está sendo obedecida e recomenda-se fazer uma precisa investigação do sistema, para que se possa descobrir a causa do desvio e a incoerência dos resultados (DULLIEN, 1992).

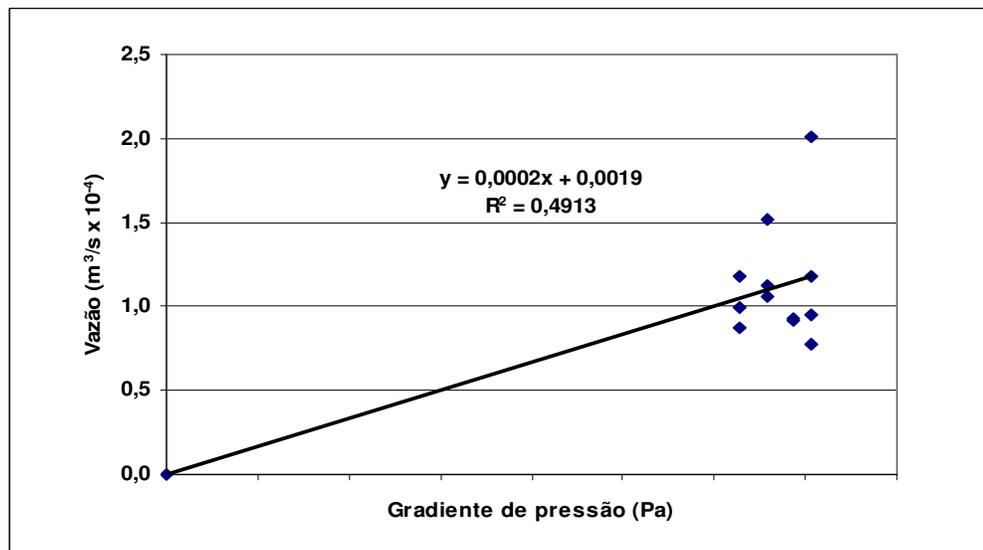


Figura 3.2 – Verificação da validade da lei de Darcy em escoamentos de meios porosos (CAMARINI *et al.*, 2008).

Uma causa freqüente para que a reta ajustada não passe pela origem do sistema é a utilização de gases para a determinação da permeabilidade, pois a compressibilidade dos gases pode fazer com que a pressão varie de uma face à outra da amostra, acarretando em grandes dispersões e alta variabilidade das medidas de permeabilidade (DULLIEN, 1992). A partir das diferenças ocasionadas pela mensuração da permeabilidade em função do fluido permeante empregado, algumas nomenclaturas têm sido utilizadas para a distinção das medidas de permeabilidade. Utiliza-se o termo permeabilidade intrínseca como sendo a constante que descreve somente as propriedades porosas da matriz, onde não há relação alguma com as propriedades do fluido ou a interação do fluido com a estrutura porosa do meio permeável. Outra denominação de permeabilidade é a de permeabilidade efetiva, onde a fração do fluido presente no interior dos poros da amostra é levada em consideração, e o seu grau de saturação é definido pela relação entre o volume total dos poros e o volume de poros preenchidos pelo fluido. A análise destes dois tipos de permeabilidade, intrínseca e

efetiva, tem mostrado que podem ocorrer diferenças significativas entre elas (SPRINGER, 1998).

Para a medição da permeabilidade a gases, recomenda-se a utilização da Equação 3.8. Essa equação também é embasada na equação de Darcy; no entanto, não considera alguns fatores que poderiam acarretar desvios dessa lei, como a variação da pressão do gás de uma face à outra da amostra e variações ocasionadas pela velocidade na parede dos poros ser maior que zero (0), como ocorre no escoamento em condutos. Este fenômeno é denominado efeito de deslizamento ou '*slip effect*' ou, ainda, '*slip flow*', como é chamado na literatura internacional (DULIEN, 1992). Devido a esse fenômeno, com gases se obtém valores maiores de coeficientes de permeabilidade, pois nos limites da interface poro-fluido, os gases possuem velocidades finitas, enquanto os líquidos possuem velocidades nulas por causa do atrito (BARROS, 2008).

$$k = \left(\frac{aL\mu}{At\rho g} \right) \cdot \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right) \quad \text{Equação 3.8}$$

Onde:

k é a permeabilidade intrínseca do material;

a é a área de seção transversal do tubo responsável pela pressão necessária para que o fluido atravesse a amostra;

A a área de seção transversal da amostra;

g aceleração da gravidade

t é o tempo necessário para o líquido contido no tubo capilar de seção a deslocar-se da altura h_0 até h_1 ;

μ é a viscosidade do fluido.

L = altura da amostra;

ρ =massa específica do fluido

A unidade dimensional da permeabilidade intrínseca é o Darcy. A porosidade de um material é considerada um (1) Darcy, medida em um cubo de arestas de 1 cm, quando

existe uma diferença de pressão de um (1) atm, que produzirá uma vazão de $1\text{cm}^3/\text{s}$, empregando um fluido permeante cuja viscosidade é de 1cP (1 centi pascal) (Equação 3.9) (GOODMAN, 1976).

$$Darcy = \frac{1(\text{cm}^3 / \text{s}).1(\text{cP})}{1(\text{cm}^2).1(\text{atm} / \text{cm})} \quad \text{Equação 3.9}$$

Quando o fluido utilizado para a estimativa da permeabilidade não é a água a $20\text{ }^\circ\text{C}$, a unidade de permeabilidade é de dimensão (L^2), pois as variações da massa específica da água devem ser consideradas. Dessa forma, 1 *Darcy* equivale a $9,86 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$. Entretanto, quando o fluido utilizado para cálculo da permeabilidade é a água a $20\text{ }^\circ\text{C}$, considera-se 1 *Darcy* equivalente a 10^{-3} cm/s (GOODMAN, 1976). A importância desses conceitos é considerável, pois geralmente a lei de Darcy é empregada em fluidos cuja temperatura não é $20\text{ }^\circ\text{C}$. Para que a lei de Darcy seja empregada em temperaturas diferentes de $20\text{ }^\circ\text{C}$, essa variação deve ser corretamente utilizada na formulação matemática, para que a permeabilidade possa ser corretamente medida.

No presente trabalho, os dados experimentais de permeabilidade ao ar do concreto serão obtidos com a utilização da Equação 3.8, sendo a unidade dimensional expressa em m^2 , de acordo como exposto nas considerações realizadas na Equação 3.9.

3.3 Tipos de escoamento em meios porosos

Os mecanismos de escoamento em meios porosos podem se diferenciar de acordo com a velocidade com que estes ocorrem. Segundo Vieira (1990) o tipo de escoamento em meios porosos pode ocorrer de três modos distintos:

- Escoamento em regime laminar;
- Escoamento em regime de transição; e
- Escoamento em regime turbulento.

Esses diferentes tipos de escoamentos podem ser melhor compreendidos observando o escoamento de fluidos em tubos, conforme ilustrados nas Figuras 3.3 a 3.5 (KATZ *et al*, 1959 *apud* VIEIRA, 1990).

A Figura 3.3 ilustra um escoamento que ocorre em regime laminar. Neste caso, as forças predominantes são essencialmente viscosas e a energia cinética do fluido é reversivelmente transformada em energia de pressão quando o fluido desloca-se do ponto 1 até o ponto 2. Quando o fluido desloca-se do ponto 2 até o ponto 3, há novamente um arranjo molecular do fluido, voltando o escoamento a ocorrer de forma laminar.

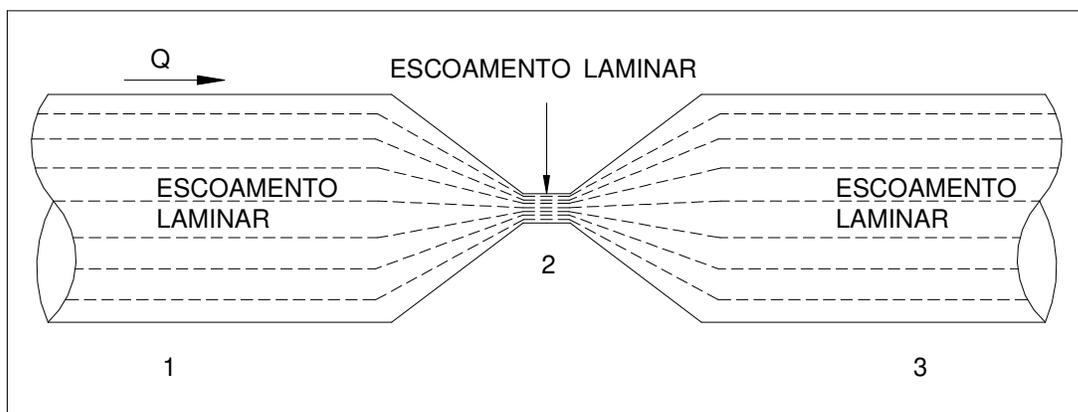


Figura 3.3 – Escoamento em regime laminar através de meio poroso (KATZ *et al*, 1959 *apud* VIEIRA, 1990).

A Figura 3.4 ilustra o escoamento em regime de transição. Este tipo de escoamento caracteriza-se por um aumento da velocidade do fluido quando há variação da área de secção transversal responsável pelo fluxo, ocasionando uma pequena turbulência no ponto 2. Entretanto, devido à baixa aleatoriedade das partículas, este escoamento não é caracterizado ainda como turbulento, sendo considerado uma fase de transição do regime de escoamento laminar para o turbulento. A turbulência ocorrerá quando há uma movimentação totalmente aleatória das moléculas do fluido em um dado período de tempo no espaço (VENNARD & STREET, 1978). No deslocamento do fluido ponto 2 para o ponto 3, o escoamento ainda ocorre de forma laminar, sendo o regime de transição somente observado nas proximidades do ponto 2.

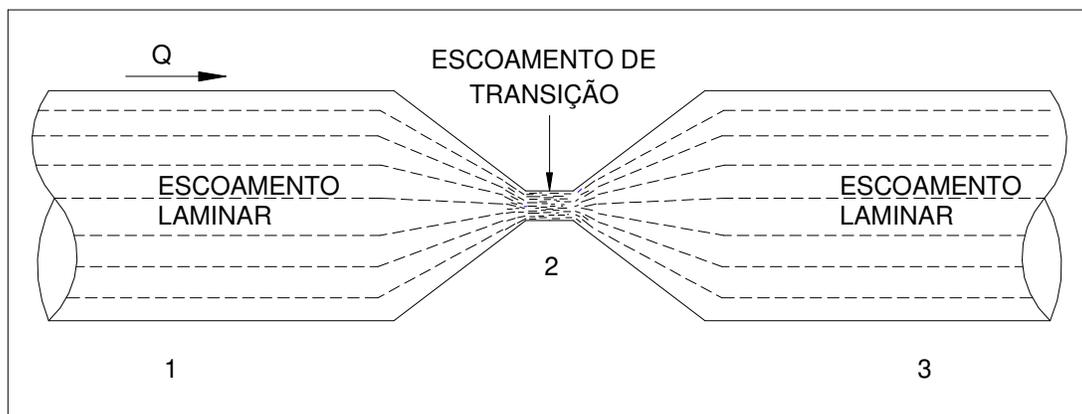


Figura 3.4 – Escoamento em regime de transição através de meio poroso (KATZ *et al*, 1959 *apud* VIEIRA, 1990).

Quando o escoamento ocorre em altas velocidades, a conversão de energia cinética no ponto 2 (Figura 3.5) é interrompida, voltando o regime a ser laminar no ponto 3, devido a estabilização do gradiente de pressão (Katz *et al*, 1959 *apud* VIEIRA, 1990).

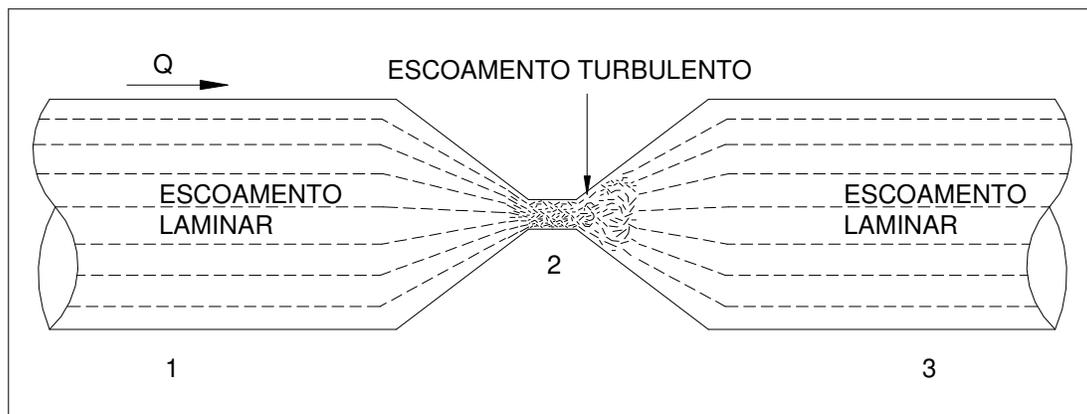


Figura 3.5 – Escoamento em regime turbulento através de meio poroso (KATZ *et al*, 1959 *apud* VIEIRA, 1990).

A turbulência causada pelo aumento da velocidade não pode ser quantificada pela lei de Darcy e os resultados de permeabilidade obtidos devem ser cuidadosamente examinados. Esse exame deve ser realizado devido à equação de Darcy somente pode ser utilizada para mensurar a permeabilidade quando o escoamento ocorre em regime laminar.

Apesar da velocidade do escoamento ser considerada como uma das principais causas do desvio da lei de Darcy, outros fatores também podem ser associados à turbulência do regime de escoamento. Um desses fatores pode ser acarretado pela alternância da forma geométrica dos poros. Essa variação pode ocasionar aumento nas tensões de cisalhamento e na tensão normal do fluido durante o escoamento em meios porosos, o que distingue o escoamento em meios porosos do escoamento em tubos (FIROOZABADI & KATZ, 1979).

A diferenciação dos três tipos de regime de escoamento em meios porosos pode ser observada na Figura 3.6, onde se associa o movimento das moléculas no interior dos poros com a velocidade de escoamento do fluido.

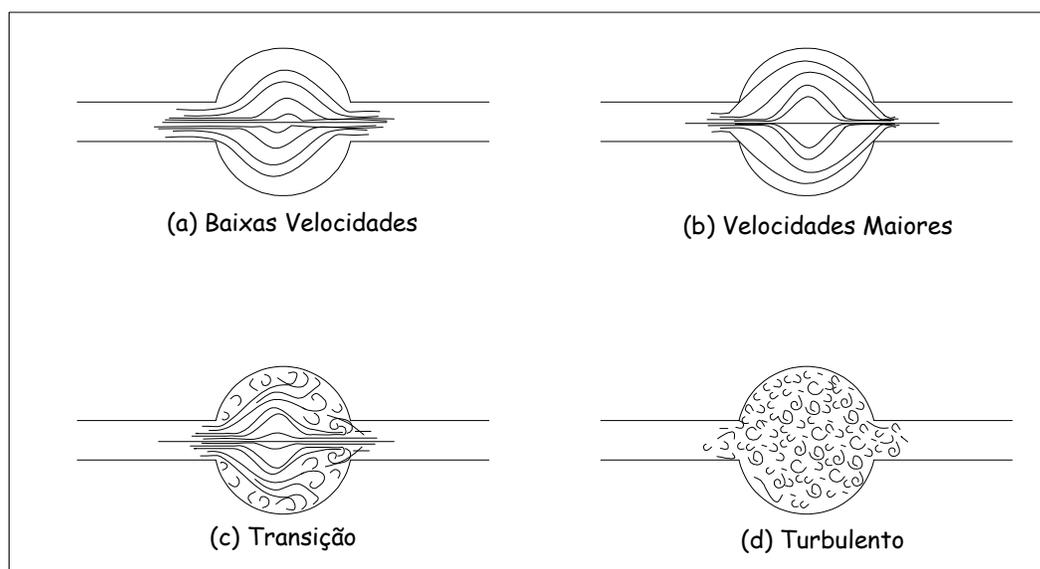


Figura 3.6 – Influência da velocidade nos tipos de escoamento em meios porosos (FIROOZABADI & KATZ, 1979).

Em escoamentos com baixas velocidades, o fluido escoava de forma paralela aos poros capilares responsáveis pelo fluxo (escoamento laminar) (Figura 3.6a). Quando a velocidade é aumentada de forma gradual, passa a ocorrer uma tendência de aleatoriedade no movimento das moléculas (Figura 3.6b). Aumentando ainda mais a velocidade, o fluido no interior dos poros do meio poroso passa para uma região de transição (Figura 3.6c) até

ocorrer um movimento totalmente randômico das moléculas, o que caracteriza o escoamento como sendo em regime turbulento (Figura 3.6d).

Neste trabalho será avaliado qual o tipo de escoamento (laminar ou turbulento) que ocorre na mensuração da permeabilidade ao ar do concreto; para isso, será avaliado o número Reynolds do escoamento, como descrito a seguir.

3.4 Número Reynolds

Em altas velocidades, a queda de pressão ocasionada pela turbulência das moléculas do fluido percolante pode causar desvios na lei de Darcy, como já descrito anteriormente. Este fato torna Lei de Darcy inadequada para a determinação da permeabilidade de meios porosos, tornando a sua medida inválida. Para que esse tipo de erro não seja cometido, pode-se avaliar o regime de escoamento do fluido (laminar, transição ou turbulento). Uma forma de avaliação da turbulência do regime pode ser realizada por meio do cálculo do número Reynolds (Re) do escoamento.

Ao analisar o comportamento do escoamento de fluidos em tubos, *Osborne Reynolds*, em seu experimento, avaliou o comportamento de um filete de tinta inserido na água em movimento. Com esse experimento, Reynolds observou que, quando as velocidades eram baixas, o filete de tinta escoava de forma organizada e paralelamente ao tubo. No entanto, quando a velocidade do escoamento era aumentada, a movimentação das moléculas do fluido tornava-se totalmente aleatória (VENNARD, 1966).

Reynolds, então, elaborou uma formulação matemática que pudesse quantificar e qualificar esses escoamentos (Equação 3.10) (GILLES, 1973):

$$Re = \frac{Vd\rho}{\mu} \quad \text{Equação 3.10}$$

Onde:

V = Velocidade média do escoamento (m/s);

d = diâmetro da amostra que é responsável pelo escoamento (m);

ρ = massa específica do fluido (Kg/m^3);

μ = viscosidade do fluido ($Pa.s$).

Com essa formulação, Reynolds classificou o escoamento em três tipos, segundo um número, que posteriormente veio a levar seu nome.

▪ **Regime de escoamento laminar:** o escoamento laminar é caracterizado por número Reynolds menores que 2100 (**Re < 2100**);

▪ **Regime de escoamento de transição:** este tipo de escoamento é caracterizado por uma região de incerteza, onde há a transição do regime de escoamento laminar para o turbulento. Esse tipo de regime pode ser caracterizado em escoamentos em que o número Reynolds se encontra na faixa de valores entre 2100 e 4000 (**2100 < Re < 4000**).

▪ **Regime de escoamento turbulento:** esta fase pode ser observada para números Reynolds superiores a 4000 (**Re > 4000**) e é caracterizada por um movimento totalmente randômico das moléculas.

Considerando a Equação 3.10 como parâmetro para a determinação do número Reynolds, outros autores, como Vennard e Street (1995) e Sheid e Massarani (2000), estabeleceram valores diferentes para a caracterização do regime de escoamento.

Por meio de estudos experimentais, esses autores concluíram que para Reynolds < 1, o regime pode ser considerado como laminar e a lei de Darcy pode ser dada como válida. Para Reynolds > 1, o regime de escoamento é considerado como turbulento e velocidade do fluido não deve ser desprezada.

Os trabalhos realizados por Houpeurt (1969 *apud* KATZ & FIROOZABADI, 1979) e o trabalho realizado por Fand (1987 *apud* VIEIRA, 1990), analisando a importância do número Reynolds na caracterização do mecanismo de escoamento em meios porosos não consolidados (esferas vítreas) e os desvios resultantes da aplicação da lei de Darcy, chegou

a conclusões de que para $Re = 1$ já começam a existir desvios dessa lei. No entanto, os efeitos da turbulência só começam a aparecer para $Re > 600$.

Fand (1987 *apud* VIEIRA, 1990) indicou a existência de quatro tipos de regimes de escoamento:

- para $Re < 1$, o regime pode ser considerado como puramente laminar;
- para $1 < Re < 200$ há uma não linearidade entre a vazão e a queda de pressão, sendo o regime ainda caracterizado como laminar;
- Regime de escoamento laminar para $200 < Re < 350$, onde começam a haver oscilações laminares e pequenas formações de vórtices, iniciando uma aleatoriedade das partículas; e
- para $Re > 350$, regime turbulento inicia-se.

No Quadro 3.1 pode ser observado o resumo da caracterização do escoamento em função do número Reynolds do escoamento, conforme observações realizadas em estudos experimentais.

	Laminar	Transição	Turbulento
Reynolds	$Re < 2100$	$2100 < Re < 4000$	$Re > 4000$
Venard e Street (1975)	$Re < 1$	-	$Re > 1$
Sheid e Massarini (2000)			
Fand (1987)	$Re < 1$ $1 < Re < 200$	$200 < Re < 350$	$Re > 350$

Quadro 3.1 – Caracterização do escoamento em função do número Reynolds.

A velocidade do escoamento, também denominada velocidade aparente (V_m), a ser utilizada na determinação do número Reynolds pode ser determinada por meio da relação entre a vazão do escoamento (Q) quantificada pela equação de Darcy e a área de secção transversal da amostra (A), dada pela Equação 3.11.

$$V_m = \frac{Q}{A} \quad \text{Equação 3.11}$$

No entanto, a velocidade média (V_p) através dos poros pode ser dada pela relação entre a velocidade média (V_m) do escoamento e a porosidade (n) do meio poroso, como apresentado na Equação 3.12 (VENNARD & STREET, 1975).

$$V_p = \frac{V_m}{n} \quad \text{Equação 3.12}$$

A caracterização do escoamento em função da sua velocidade determina, para baixos números Reynolds, valores menores de 2100, que o escoamento ocorre em regime *Darcyniano* (laminar) puramente viscoso. E para altos números Reynolds o escoamento ocorre em regime de Forchheimer (Equação 3.13). O regime de Forchheimer é utilizado quando se mede escoamentos em altas velocidades, pois nessa formulação matemática, os efeitos da turbulência, ocasionados pela alta velocidade do fluido permeante são levados em consideração (Equação 3.13) (SMIT & Du PLESSIS, 1999).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad \text{Equação 3.13}$$

Onde:

ΔP = variação de pressão;

L = comprimento do escoamento do fluido;

μ = viscosidade do fluido;

k_1 = constante darciniana de permeabilidade;

v_s = velocidade do escoamento;

ρ = massa específica do fluido;

k_2 = constante não-darciniana de permeabilidade.

Nesse trabalho, o número Reynolds será empregado para avaliar qual o regime de escoamento (laminar ou turbulento) ocorre na determinação da permeabilidade ao ar do concreto, quando, para isso se emprega a metodologia proposta por Thenoz (1969).

3.5 Efeito da compressibilidade do fluido em escoamento em meios porosos e o número Mach

Dentre os principais fatores que podem ocasionar desvios na lei de Darcy, destacam-se, entre outros, a velocidade do escoamento e a variação da massa específica do fluido permeante durante o escoamento. Em meios porosos como os compósitos à base de cimento, a permeabilidade depende não somente da porosidade do material, mas também do tamanho, distribuição, forma geométrica e conexão entre os poros (TSIVILIS *et al.*, 2003).

Além de fatores como a porosidade, as propriedades do fluido também podem comprometer a medição da permeabilidade de meios porosos. Isso ocorre devido a uma diferença existente entre o escoamento de líquidos e gases no interior dos poros do meio avaliado. No escoamento de gases, a velocidade na parede dos poros, ou seja, na interface fluido-meio poroso, não pode ser considerada como zero. No entanto, em escoamento de líquidos a velocidade nesta região é considerada como nula. A explicação dessa diferença está no conceito que em escoamentos de gases não há uma lâmina de fluido na parede dos poros onde, para líquidos, a velocidade do escoamento é zero, como ocorre quando se determina o perfil de velocidades no escoamento de líquidos em tubos (DULLIEN, 1992).

Embora o comportamento fluido-dinâmico do escoamento de gases e líquidos em meios porosos seja muito bem conhecido e compreendido, o comportamento desses dois fluidos durante escoamento é bastante diferenciado. Na maioria dos estudos realizados, a compressibilidade dos gases é desprezada, pois a velocidade durante o escoamento é considerada como sendo demasiadamente baixa. No entanto, para fluidos incompressíveis, o gradiente de pressão durante o escoamento em meios porosos faz com que o gás sofra um efeito de descompressão quando percorre a distância de uma face a outra do meio. Esse efeito proporciona um aumento da velocidade do fluido ao longo da sua trajetória, ocasionando em uma modificação da velocidade e de perdas de energia (INNOCENTINI *et al.*, 1999). Devido a esse efeito, a compressibilidade do gás deve ser considerada, pois mesmo em meios porosos cuja velocidade de escoamento é relativamente pequena, pode haver uma descompressão durante o escoamento, acarretando em perdas de energia

(cinética e de pressão) e comprometimento dos resultados de permeabilidade obtidos (INNOCENTINI *et al.*, 1999b).

Uma maneira de se avaliar a compressibilidade de fluidos durante o escoamento em meios porosos pode ser obtida por meio da avaliação do número Mach (M) do escoamento.

O número Mach tem a função de avaliar e caracterizar e quantificar as variações da massa específica do fluido durante um determinado escoamento. É definido como sendo a relação existente entre a velocidade do fluido durante o escoamento e a velocidade de propagação do som no fluido utilizado (STREETER, 1977), de acordo com a Equação 3.16.

$$M = \frac{V}{c} \quad \text{Equação 3.16}$$

Onde:

V = Velocidade do fluido durante o escoamento (m/s);

c = velocidade do som no fluido (m/s).

Quando o número Mach é menor que 0,3 (**Mach < 0,3**) os efeitos da compressibilidade do fluido podem ser desprezados. No entanto, quando o número Mach é maior que 0,3 (**M > 0,3**) o comportamento do fluido durante o escoamento deve considerado como compressível (LISBOA, 2000).

O número Mach será utilizado nesse trabalho para avaliar os fenômenos de variação da massa específica do ar durante o ensaio de permeabilidade ao ar do concreto e verificar se ocorrem fenômenos de variação de compressibilidade do ar no interior da amostra de concreto durante a realização do ensaio de permeabilidade ao ar.

4

Mecanismos de transporte no concreto

Os mecanismos de transporte de massa no concreto são os principais responsáveis pelo ingresso e movimentação de agentes deletérios em seu interior, os quais podem comprometer e desestabilizar sua estrutura físico-química e, dessa maneira, exercem grande influência na durabilidade desses compósitos. Nesse sentido, os estudos dos mecanismos de transporte de matéria no interior do concreto, tais como difusão iônica, absorção capilar e a permeabilidade são relevantes, pois esses meios podem ser considerados parâmetros importantes para a determinação de sua vida útil. Esses estudos têm o intuito de avaliar os fenômenos responsáveis pela movimentação de matéria que ocorre no interior de sua microestrutura, de maneira a tentar minimizar a interação dos agentes agressivos com os produtos resultantes da hidratação do cimento. Essas interações podem ocasionar reações químicas indesejáveis, proporcionando desestabilidade química e conseqüentes danos físicos, macro e microscópicos, como fissuração, perda de resistência mecânica, danos estéticos e diminuição de sua vida útil.

Assim, este capítulo tem o objetivo de abordar os conceitos referentes aos fenômenos de difusão iônica, carbonatação, assim como as melhorias na durabilidade do concreto proporcionadas pelo emprego de adições minerais.

4.1 Mecanismo de difusão iônica

Denomina-se difusão iônica o fenômeno de transporte que ocorre por meio da movimentação de átomos através do interior de um material. Esse mecanismo ocorre por meio de transporte de íons de uma região de alta concentração para uma região de baixa concentração e pode ocasionar danos à sua microestrutura (CALLISTER, 2002).

A difusão iônica pode ocorrer de duas maneiras diferentes, em estado estacionário e em estado não-estacionário (CALLISTER, 2002), conforme detalhadamente descritas abaixo.

4.1.1 Difusão iônica em estado estacionário

A difusão em estado estacionário depende exclusivamente do tempo necessário para que a quantidade de um elemento seja transportada para o interior de outro, conforme é ilustrado na Figura 4.1.

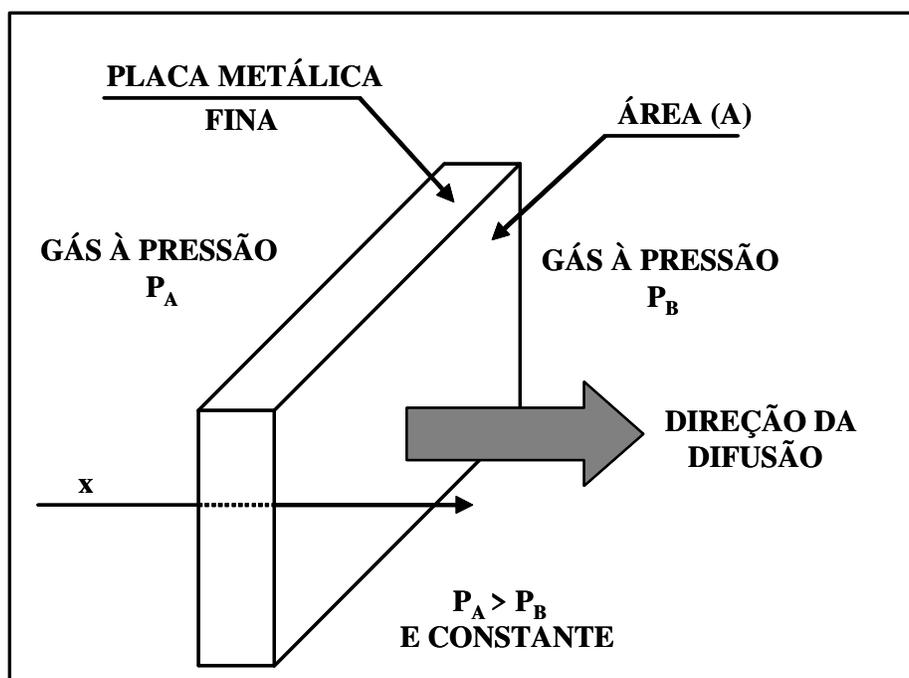


Figura 4.1 – Difusão em estado estacionário em uma placa de metal (CALLISTER, 2002).

A taxa desse transporte, também denominado fluxo de difusão, (J) é expressa pela relação entre o número de átomos (M) e o produto da área de secção transversal da amostra (A) pelo tempo (t), conforme pode ser observado na Equação 4.1 (CALLISTER, 2002).

$$J = \frac{M}{At} \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde:

J = Fluxo de difusão ($g/m^2.s$)

M = Massa (g);

A = Área de secção transversal (m^2); e

t = tempo (s).

Para que o fluxo de difusão ocorra, é necessário que exista um diferencial de pressão entre as faces opostas do material (Figura 4.1). Esse fluxo é considerado unidirecional e ocorre no sentido de maior pressão (P_A) para o de menor pressão (P_B), isto é, $P_A > P_B$. Diante dessa movimentação, uma concentração (C_x) desloca-se através de um material com área de secção transversal (A) no sentido de P_A para P_B ao longo do eixo (x).

Assim, se uma dada concentração (C) é determinada em uma posição (x) de um sólido, a reta obtida é considerada como sendo o seu perfil de concentração. Dessa maneira, é gerada uma reta e seu respectivo coeficiente angular. Nesse sentido, um dado ponto na reta gerada é denominado gradiente de concentração, conforme apresentado na Equação 4.2 (CALLISTER, 2002) e ilustrado na Figura 4.2.

$$\text{gradiente de concentração} = \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde:

∂C = diferença de concentração; e

∂x = variação na distância no sólido (m).

A Figura 4.2 ilustra a existência de uma concentração C_A em uma posição x_A e uma concentração C_B em uma posição x_B , para fenômenos de difusão em estado estacionário, o diferencial de concentração pode ser considerado com linear, conforme exposto na Equação 4.2.

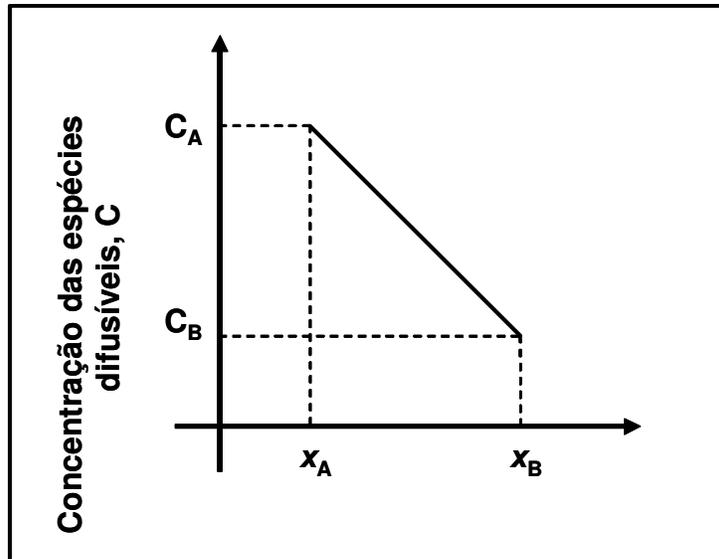


Figura 4.2 – Perfil de concentração de espécies difusíveis (CALLISTER, 2002)

Quando o fluxo de difusão é proporcional ao gradiente de concentração, então o fluxo pode ser expresso pela 1ª Lei de Fick (Equação 4.3).

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde:

$-D$ = coeficiente de difusão, que tem sinal negativo, pois a difusão ocorre no sentido da região de maior para a de menor concentração (m^2/s).

A 1ª Lei de Fick é empregada quando se pretende medir a rapidez da ocorrência do fenômeno da difusão, isto é, a taxa de transferência de massa em sólido exposto a uma determinada concentração.

4.1.2 Difusão iônica em estado não-estacionário

O mecanismo de difusão iônica em estado não-estacionário pode ser caracterizado quando o fluxo de difusão e o gradiente de concentração em um dado ponto no interior de

um sólido variam ao longo do tempo (CALLISTER, 2002). A maioria dos fenômenos de difusão ocorre em estado não-estacionário. Quando a difusão ocorre em estado não-estacionário, a 1ª Lei de Fick não pode ser mais empregada para descrever o fluxo de difusão. Então, deve-se utilizar a 2ª Lei Fick, conforme pode ser observado na Equação 4.4 (CALLISTER, 2002).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad \text{Equação 4.4}$$

Quando o coeficiente de difusão é independente da concentração, pode-se utilizar a seguinte equação (Equação 4.5):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Equação 4.5}$$

Onde:

D = coeficiente de difusão (m^2/s).

Aplicando as seguintes condições de contorno, para $t=0$ e $C_0=0$, tem-se:

Para $t = 0$, C_0 em $0 \leq x \leq \infty$ (Condição de contorno);

E para $t > 0$, $C = C_s$ (a concentração superficial constante) em $x = 0$,

$C = C_0$ em $x = \infty$ (Condição de contorno).

A solução da Equação 4.5 que atende às condições de contorno pode ser expressa na forma da Equação 4.6.

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad \text{Equação 4.6}$$

Onde: C_x é a concentração em uma profundidade x em um tempo t ; C_0 é a concentração dos átomos do soluto antes da difusão iniciar; C_s é a concentração constante na superfície do sólido; $erf\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ representa a função de erro de Gauss.

Assim, por meio da Equação 4.6 pode-se estabelecer a concentração em um instante de tempo qualquer.

4.1.3 Mecanismo de difusão iônica no concreto

Para a determinação do coeficiente de difusão do concreto, é necessário que a taxa de difusão ocorra em estado estacionário. Analisando o coeficiente de difusão do concreto, Sugiyama *et al.* (1996), obteve uma condição de estado estacionário da difusão de íons cloreto, por meio de método de aceleração elétrica, após 7 dias, em concretos preparados com agregados convencionais, e 2 dias, para concretos preparados com agregados leves. Nesse estudo foi observado que o coeficiente de difusão de íons cloreto aumentou 2,2 vezes quando a relação água/cimento aumentou de 0,4 para 0,6, demonstrando que o coeficiente de difusão de íons cloreto no concreto diminui com a diminuição da relação água/cimento da mistura.

A determinação da taxa de difusão de íons no concreto é um parâmetro importante para avaliar a sua durabilidade, pois concretos mais duráveis possuem menores valores de coeficientes de difusão (D). Grandes superfícies de exposição e altas taxas de fluxo de agentes agressivos influenciam diretamente no coeficiente de difusão iônica do concreto, assim como a concentração de íons presentes no ambiente e o ambiente de exposição (McGRATH, 2000).

No concreto, a difusão iônica depende exclusivamente da quantidade de água presente no interior de seus poros, pois somente dessa maneira a movimentação de íons pode ocorrer. A movimentação iônica nos poros do concreto acarreta em interações químicas desses íons com os compostos hidratados da pasta de cimento, podendo gerar reações de

carbonatação, reações de oxidação e despassivação da armadura em concreto armado. Essas reações ocorrem com maior facilidade em concretos expostos a ambientes agressivos, que podem conter elevadas concentrações de íons agressivos, influenciando significativamente na sua durabilidade e na sua vida útil (NUNES & HELENE, 1998; PEREIRA & CINCOTTO, 2001).

A taxa de ingresso e movimentação dos íons na estrutura interna do concreto depende da composição química do cimento, da relação água cimento, do grau de hidratação e do tipo de adições existentes. Adições minerais, como sílica ativa, escória de alto forno, cinza volante podem modificar a estrutura interna do concreto, devido produzir uma quantidade de produtos de hidratação, que permite um refinamento dos poros, fazendo com que o concreto possa tornar-se mais durável (RAO, 2003).

4.2 Adições minerais

As adições realizadas no cimento possuem finalidades técnicas e econômicas, pois melhoram o desempenho do concreto e são mais baratas que o clínquer utilizado na fabricação do cimento.

As modificações na microestrutura de concretos e argamassas, por meio do emprego de adições minerais, acontecem devido às adições proporcionarem uma maior quantidade de produtos hidratados presentes na pasta de cimento, modificando a sua microestrutura e ocasionando a melhoria de diversas de suas propriedades, principalmente da resistência à compressão, do módulo de elasticidade, da resistência à tração, da resistência à abrasão, além de melhorar propriedades relativas à sua durabilidade (CHUNG, 2002; PON *et al.*, 2006; SILVA & LIBÓRIO, 2006; SOUZA & JOHN, 2007).

As adições minerais realizadas no cimento proporcionam ao concreto diversas peculiaridades que o torna mais viável técnica e economicamente, melhorando a sua trabalhabilidade, suas propriedades mecânicas, assim como a diminuição de sua fissuração térmica e durabilidade frente a ataques químicos (BARDELLA, 2005).

Os fenômenos de refinamento do tamanho do grão e refinamento do tamanho do poro aumentam a resistência mecânica e a durabilidade do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008), ocasionando menores coeficientes de absorção de água por capilaridade (BARDELLA, 2003).

4.3 Mecanismo de absorção capilar

A absorção de água por capilaridade do concreto é considerada um dos principais mecanismos que proporciona sua deterioração. Concretos expostos a ambientes agressivos, isto é, ambientes que contêm altas concentrações de íons cloreto, íons sulfatos e outros agentes agressivos, podem sofrer processos de corrosão da armadura e deterioração físico/química da sua microestrutura. Fatores tais como preparação da mistura, seu adensamento e cura apropriada podem influenciar significativamente no mecanismo de absorção de água por capilaridade do concreto. Concretos mais duráveis podem ser melhor produzidos quando suas características são melhores especificadas e projetadas em função das propriedades desejadas, assim como quando a dosagem e proporções dos materiais constituintes são corretamente determinadas. Os principais fatores de dosagem que podem influenciar na absorção de água por capilaridade do concreto é a relação água/cimento, consumo de cimento, quantidade de agregados e tipos de adições realizadas (BUTLER, 1997).

Os danos físico/químicos em estruturas de concreto, proporcionados por absorção de água por capilaridade, tendem a ocorrer no início da sua vida útil, devido ao rápido transporte de íons através do concreto de cobrimento, o que, conseqüentemente, pode comprometer a integridade da armadura. No entanto, os valores de absorção capilar medidos no contato inicial com a água também são indicativos da durabilidade avançada de estruturas de concreto, pois apesar de ensaios de absorção poderem ser realizados por um período longo de tempo, as primeiras quatro horas iniciais de contato com a água apresentam valores suficientes para que o mecanismo de absorção capilar e sua respectiva influência na durabilidade do concreto possa ser determinado (BUTLER, 1997).

A taxa de absorção capilar do concreto é governada pela pressão capilar dos seus poros, a qual é determinada pelo diâmetro, forma e conexão dos poros presentes em sua microestrutura. Tratando-se da penetração de íons, a absorção capilar do concreto é um processo muito rápido, sendo considerado um milhão de vezes mais rápido do que a sua permeabilidade (BUTLER, 1997; NUNES & HELENE, 1998).

A absorção de água pelo concreto é considerada uma de suas principais propriedades de durabilidade, pois agentes agressivos à sua integridade somente possuem meios de migração e movimentação em sua estrutura porosa quando há presença de água dentro de seus poros capilares. (CAMARINI, 1999).

A absorção de água do concreto pode ser um indicativo de sua durabilidade e diversas propriedades intrínsecas ao material podem influenciá-la, conforme os comprovados por Camarini (1999):

- A cura adequada proporciona menores resultados de absorção de água do concreto;
- O processo de cura térmica ocasiona modificações microestruturais, aumentando a porosidade superficial, assim como aumentando o coeficiente de absorção de água por capilaridade;
- Concretos que submetidos a cura ambiente apresentaram maiores valores de absorção capilar do que aqueles submetidos a algum tipo de cura.

Dessa maneira, diversos fatores devem ser empregados para que se possa diminuir a absorção de água por capilaridade do concreto e especificações adequadas devem ser realizadas quando se deseja que a sua durabilidade não seja comprometida, quando esse encontrar-se exposto à agentes que podem comprometer a sua estabilidade de sua microestrutura. Nesse sentido, é fundamental que sejam realizadas dosagens corretas, medidas de relação água/cimento sejam especificadas eficazmente e que processos de cura sejam adequadamente empregados em função do ambiente de exposição do concreto.

4.4 Permeabilidade

A permeabilidade do concreto é uma propriedade estritamente relacionada com a sua durabilidade. Dessa maneira, diversas pesquisas têm sido realizadas para avaliar essa propriedade do concreto (ABDIAS *et al.*, 2003; PEREIRA & CAMARINI, 2011, CAMARINI, 2011).

A durabilidade de estruturas de concreto depende da quantidade, forma e conexão dos poros distribuídos em sua microestrutura, o que determina a maior ou menor facilidade que agentes deletérios podem percolar no seu interior, podendo comprometer a sua estabilidade química e física (REGATTIERI & HELENE, 1999). Assim, é cada vez mais importante utilizar concretos menos permeáveis para que se possa garantir a durabilidade de estruturas produzidas com esse material (ABDIAS *et al.*, 2003).

Estudos têm demonstrado que diversos fatores podem influenciar a permeabilidade do concreto, como cura, relação água/cimento e idade de hidratação (CAMARINI, 2011; PEREIRA & CAMARINI, 2011).

A permeabilidade aos gases do concreto não é um mecanismo muito comum em estruturas de concreto, no entanto, por meio desses ensaios, tem se buscado caracterizar a sua porosidade e correlacioná-la com os mecanismos de difusão de dióxido de carbono, de oxigênio e se estabelecer parâmetros de durabilidade (NEPOMUCENO, 2005).

A permeabilidade do concreto à água é uma das principais propriedades do concreto que determina a sua durabilidade, pois somente há migração e movimentação de agentes deletérios no concreto quando os seus poros capilares estão saturados. A permeabilidade do concreto à água depende da relação água/cimento utilizada na mistura, a qual determina o tamanho, volume e continuidade dos poros capilares, como depende também, da dimensão máxima dos agregados, que influencia nas microfissuras da zona de transição (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Dessa, forma, a resistência do concreto aos ataques químicos é diretamente influenciada pela sua permeabilidade, a qual é totalmente dependente da sua porosidade capilar (MOREIRA, FIGUEIREDO & HELENE, 2001).

Devido à permeabilidade do concreto tratar-se de uma propriedade tão importante e praticamente ditar a sua vida útil, como também ser tema principal do presente estudo, no próximo capítulo, o assunto é abordado mais detalhadamente, como pode ser observado a seguir.

5

Permeabilidade do concreto

A permeabilidade do concreto é a principal propriedade que determina a sua durabilidade, assim como é fator dependente de suas propriedades intrínsecas e dos materiais que o constitui, tais como (NAIK & SINGH, 1994; BASHEER *et al.*, 2005):

- Tipo de cimento;
- Tipo e características físicas dos agregados;
- Fatores de projeto, como relação água/cimento, escolha e proporção dos materiais constituintes;
- Métodos de preparo;
- Tipo e período de cura empregada;
- Adições minerais e seus conseqüentes efeitos; e
- Compactação.

Dentre os fatores que controlam a taxa de fluxo e movimentação de fluidos para o interior do concreto, ou seja, a sua permeabilidade pode-se destacar (OLLIVIER & MASSAT, 1992):

- Tamanho e distribuição dos poros;
- Microfissuras presentes e suas inter-conectividades;
- A natureza das fases presentes no concreto (fase agregado, fase aluminato, fase silicato) e a reatividade dessas fases com as espécies químicas deletérias.

Devido à grande importância da permeabilidade na caracterização e influência na durabilidade do concreto, diversos modelos para determiná-la têm sido desenvolvidos e testados (VERDIER *et al.*, 2002; PAULINI, 2010), tais como os modelos baseados na Lei de Darcy, modelo de Katz-Thompson, método de Figg, Método de Thenoz, entre outros. Dessa maneira, esse capítulo tem o objetivo de descrever os principais métodos

empregados para medir a permeabilidade do concreto, enfatizando as metodologias e equacionamentos matemáticos neles empregados.

5.1 Modelo baseado na Lei de Darcy

A maioria das metodologias empregadas para medir a permeabilidade de meios porosos utiliza o equacionamento matemático embasado na Lei de Darcy, como em medições da permeabilidade de rochas, de solos e de materiais à base de cimento (BÁGEL & ZIVICA, 1997; SPRINGER *et al.*, 1998; PAULINI & NASUTION, 2007). No entanto, a lei de Darcy pode ser empregada somente quando são realizadas algumas considerações e simplificações físicas. Dentre estas considerações, pode-se destacar (BANTHIA & MINDESS, 1989):

- a pressão ocasionada pelo fluido no interior da amostra pode ser desprezada;
- o efeito da temperatura deve ser negligenciado;
- a compressibilidade da amostra sob estado triaxial de tensões deve ser ignorada;
- o regime de escoamento deve ser considerado como laminar.

Darcy, em 1856, desenvolveu a teoria que determina o escoamento laminar e lento em meios porosos homogêneos. Em seu experimento (Figura 5.1), Darcy preencheu, com água, um filtro homogêneo de altura h e de áreas de secções transversais constantes (A). A partir do preenchimento do filtro com água, os manômetros foram abertos para medir a pressão nos pontos inferior e superior, fornecendo, assim, as alturas h_1 e h_2 . Por meio das variações encontradas, Darcy, desenvolveu a Equação 5.1 (LISBOA, 2001).

$$Q = -k \frac{A}{\mu} \cdot \frac{dh}{dx} \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde:

Q = vazão (m/s);

k = constante de permeabilidade (k tem sinal negativo devido o fluxo ocorrer do sentido de maior pressão para o de menor pressão);

A = área de secção transversal da amostra (m^2);

μ = viscosidade do fluido ($Pa.s$);

$\frac{dh}{dx}$ = perda de carga.

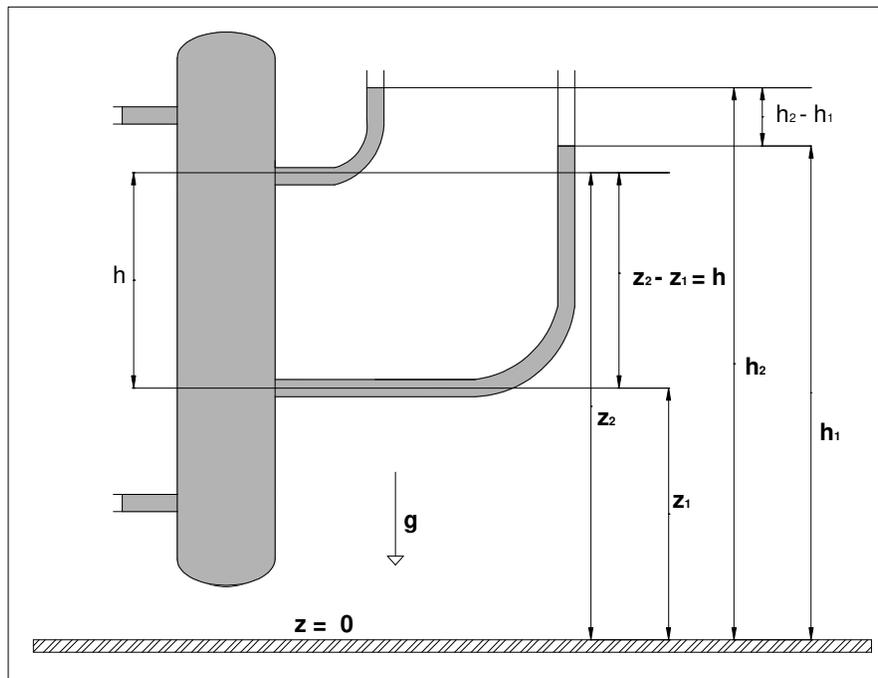


Figura – 5.1 Esquema do aparato empregado por Darcy para determinação da permeabilidade de meios porosos (LISBOA, 2001).

A Equação 5.1 somente pode ser utilizada para escoamentos demasiadamente lentos e para escoamentos onde as forças predominantes são as forças viscosas, pois a lei de Darcy prevê somente a queda de pressão ocasionada por essas forças. Forças viscosas são geradas por meio de atrito entre as moléculas do fluido e também pelo atrito entre o fluido e o meio poroso (PARDO *et al.*, 2000).

Quando o fluido empregado para a medição da permeabilidade do material é a água a 20 °C pode ser escrita na forma da Equação 5.1. Nesta equação, o coeficiente k é denominado condutividade hidráulica e possui dimensão de velocidade, ou seja, m/s^2 .

Entretanto, quando a temperatura da água varia consideravelmente, tendo valores diferentes de 20 °C e/ou outros fluidos são utilizados para a determinação da permeabilidade, a lei de Darcy deve ser escrita como mostra a Equação 5.2.

$$Q = \frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} A \quad \text{Equação 5.2}$$

Onde:

Q = vazão (m/s);

$\frac{dp}{dx}$ = diferencial de pressão ao longo da altura da amostra;

p = a pressão do fluido, determinada por γh (N/m^2);

μ = viscosidade do líquido permeante ($Pa.s$);

A = área de secção transversal da amostra (m^2).

No entanto, quando a lei de Darcy toma forma mostrada na Equação 5.2, o coeficiente hidráulico (k), ou também denominado coeficiente de permeabilidade, toma dimensões de área (m^2), isto acontece quando o coeficiente hidráulico (k) independe das propriedades do fluido.

Em escoamentos através de meios porosos, onde a velocidade do fluido é elevada, além das forças viscosas, há perdas de energia ocasionadas por forças inerciais. As forças inerciais são geradas por meio da transformação da energia de cinética do escoamento em energia de pressão, ocasionando variações na queda de pressão do escoamento, podendo invalidar a Equação 5.1 e a Equação 5.2, invalidando, conseqüentemente, a Lei de Darcy (VIEIRA, 1990).

De forma análoga, a lei de Darcy somente pode ser empregada quando o escoamento ocorre de forma laminar (VIEIRA, 1990; INNOCENTINI, 2000) e, dessa forma, os resultados obtidos por essa metodologia e equacionamento podem ser avaliados utilizando-se o número Reynolds, de modo que o escoamento estudado e os dados da medição da permeabilidade do meio poroso possam ser analisados (SCHEID & MASSARANI, 2002).

5.2 Modelo de Katz-Thompson

O conceito da teoria de percolação de Katz-Thompson é derivado da relação da permeabilidade de meios porosos com suas propriedades microestruturais e de condutividade (Equação 5.3).

$$K' = \frac{1}{226} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) (l_c)^2 \quad \text{Equação 5.3}$$

Onde:

K' = a condutividade hidráulica (m^2);

σ = a tensão de condutividade elétrica (Ω);

σ_0 = a condutividade da água nos poros ($\Omega^{-1}m^{-1}$); e

l_c = o diâmetro crítico dos poros (m).

Esse modelo é empregado para a determinação da permeabilidade de rochas areníticas e sedimentares e têm sido utilizados para a medição da permeabilidade de materiais à base de cimento (TUMIDAJSKI & LIN, 1998; EL DIEB & HOOTON, 1993). No entanto, a aplicação desse modelo para a obtenção da permeabilidade do concreto ainda têm gerado algumas discussões e dúvidas sobre os resultados obtidos, pois alguns trabalhos têm gerado valores aceitáveis da permeabilidade do concreto e, em outros, esse modelo tem demonstrado ser ineficaz, sugerindo que testes mais aprofundados devam ser realizados para que o modelo possa ser validado (TUMIDAJSKI & LIN, 1998; EL DIEB & HOOTON, 1993; GARBOCZI, 1990).

Pesquisas utilizando o modelo de Katz-Thompson para medir a permeabilidade do concreto têm demonstrado que os resultados teóricos são da ordem de duas grandezas exponenciais menores do que os resultados experimentais, não correspondendo, dessa forma, aos valores reais da permeabilidade (TUMIDAJSKI & LIN, 1998).

A diferença entre os resultados de permeabilidade por meio do modelo de Katz-Thompson e os resultados medidos experimentalmente pode ser observada na Tabela 5.1

(TUMIDAJSKI & LIN, 1998). Os resultados foram obtidos em concretos com duas relações água/cimento ($a/c=0,55$ e $a/c=0,65$) e os valores da permeabilidade apresentados correspondem aos valores obtidos para concretos preparados com escória de alto-forno e traço de 1:2:3 (cimento + escória: agregado miúdo:agregado graúdo).

Tabela 5.1 – Resultados de permeabilidade medidos experimentalmente e calculados por meio do modelo Katz-Thompson (adaptado TUMIDAJSKI & LIN, 1998).

a/c	Idade	K_{calc} (m/s) x 10^{11}	K_{medido} (m/s) 10^9
0,55	7	0,38	0,75
	14	0,07	0,82
	21	0,04	0,55
	28	0,03	0,08
0,65	7	1,58	4,97
	14	0,76	4,62
	21	-	-
	28	0,35	5,96

5.3 Método de Figg

O método de Figg empregado para a determinação da permeabilidade ao ar do concreto consiste em realizar um furo no interior de uma amostra de concreto, onde após a vedação do furo e injeção de uma agulha (a agulha é injetada para que o ar do interior da cavidade seja retirado, criando um diferencial de pressão entre o ar da cavidade e o meio externo), medir o tempo necessário para que a pressão dentro da cavidade tenha uma variação de 5 kN/m^2 ($\sim 0,05 \text{ atm}$). O aparato para medir a permeabilidade ao ar pelo método de Figg é ilustrado na Figura 5.2 (CATHER *et al.*, 1984).

Conforme pode observado na Figura 5.2, é realizada uma cavidade no concreto, em seguida veda-se a parte superior dessa com espuma expansiva e o restante da parte superior é preenchida com silicone, formando um sistema fechado. Em seguida é inserida uma

agulha na cavidade para que, então, seja criado um sistema com pressão inferior à pressão atmosférica, por meio da sucção de ar presente no interior da cavidade pela agulha.

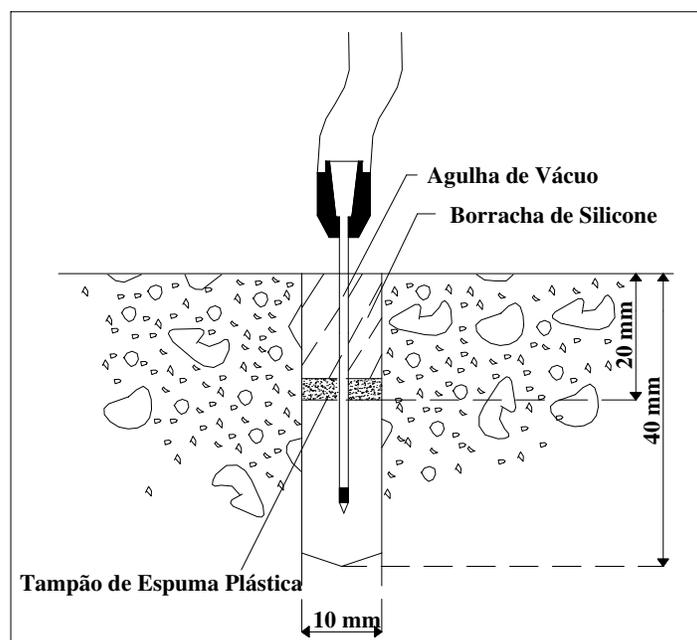


Figura 5.2 – Desenho esquemático do método Figg para determinação da permeabilidade do concreto (CATHER *et al.*, 1984).

A diferença de pressão empregada é de 5 kN/m^2 , pois com este valor tem-se demonstrado que o comportamento da relação pressão *versus* o tempo é linear e pelo fato desse diferencial ser o que tem apresentado resultados mais realísticos da permeabilidade do concreto, quando comparado a outros diferenciais de pressão empregados nesse método. Para materiais pouco permeáveis, onde o tempo de fluxo é relativamente longo, pode-se realizar um ensaio com uma diferença de pressão de 1 kN/m^2 , para então multiplicar o tempo por cinco (5), o que daria uma boa estimativa do tempo total de fluxo devido à linearidade dos resultados (SUGUYAMA *et al.*, 1996). No entanto, este tipo de estimativa não é recomendado em todas as metodologias de medição da permeabilidade do concreto, pois com o fluxo de fluido através dos poros do concreto, pode ocorrer um preenchimento e estanqueamento desses poros com partículas soltas, fazendo com que a permeabilidade do material diminua com o decorrer do tempo e do teste, ocasionando em um sistema não-linear (BANTHIA & MINDESS, 1989).

O método de Figg tem demonstrado algumas variações nos resultados de permeabilidade obtidos, como variação dos resultados em função das dimensões da cavidade. Medidas realizadas seqüencialmente em uma mesma amostra têm gerado tempos diferentes para o fluxo do ar no interior do concreto, o que comprova a variação dos resultados em função do tempo do ensaio devido à não linearidade do sistema, conforme descrito anteriormente. Para analisar este fenômeno, Cather *et al.* (1996) avaliou suas possíveis causas e chegou à conclusão de que a medida do tempo, com uma pressão diferencial de 5 KN/m², reflete a retirada de ar dos poros do concreto no interior da cavidade, não chegando a ocorrer troca de ar com a superfície, dando mais confiabilidade, então, aos resultados obtidos.

Por meio dos resultados obtidos em seus experimentos, Cather *et al.* (1984), propôs uma classificação da qualidade de materiais à base de cimento, como pode ser observado no Quadro 5.1.

Categoria de Qualidade	Tempo (s)	Interpretação	Tipo de Material
0	< 30	Pobre	Argamassa porosa
1	30 – 100	Moderado	Concreto com resistência à compressão de 20 N/mm ²
2	100 – 300	Satisfatório	Concreto com resistência mecânica entre 30 a 50 N/mm ²
3	300 – 1000	Bom	Concreto adensado e bem curado
4	> 1000	Excelente	Concreto com polímeros

Quadro 5.1 – Classificação de materiais à base de cimento em função da permeabilidade (CATHER *et al.*, 1984).

Pihlajavaara e Paroll (1975), determinando a permeabilidade ao ar do concreto com diferentes relações água/cimento, resistências do concreto e dimensão máxima dos agregados, por meio do método de Figg, concluíram que a permeabilidade do concreto tende a aumentar quando a dimensão máxima do agregado também aumenta, conforme pode ser observado por meio de análise das Tabelas 5.2 e 5.3.

É possível observar, por meio das Tabelas 5.2 e 5.3 uma grande dispersão dos valores de permeabilidade obtidos. Segundo Pihlajaavara & Parol (1975), essa dispersão por ter sido ocasionada devido ao concreto ser um material bastante heterogêneo. No entanto, de

acordo com Barros (2008) o complexo procedimento para vedação dos furos com silicone, assim como secagem inadequada do mesmo silicone empregado para a vedação da cavidade, pode ocasionar vazamentos de ar do interior da amostra. Pode ocorrer também a obstrução da agulha, o que prejudica a obtenção de resultados confiáveis, mostrando que aprimoramentos no método ainda devem ser realizados.

Tabela 5.2 – Grupo de amostras 1-2: dimensão máxima do agregado de 8 mm (adaptado de PIHLAJAVAARA & PAROLL, 1975).

Classe de Resistência	Amostras	Valores estatísticos	Perm. ao ar (amostras não secas em estufa)	Amostras secas em estufa		Resistência à tração (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
				Perm. ao ar	Absorção de água		
25 MPa (a/c=0,75)	A1	MV* R**	- -	- -	- -	1,4	23
	A2	MV R	142 s 52 s	11s 10 s	32 s 47 s	1,6	22
	S1	MV R	- -	- -	- -	1,2	20
	S2	MV R	145 s 74 s	9 s 9 s	15 s 16 s	1,6	21
45 MPa (a/c=0,42)	A1	MV R	411 s 540 s	29 s 10 s	104 s 98 s	2,4	47
	A2	MV R	476 s 327 s	28 s 27 s	205 s 388 s	2,2	46
	S1	MV R	369 s 443 s	36 s 23 s	149 s 119 s	1,9	44
	S2	MV R	345 s 229 s	27 s 14 s	99 s 119 s	2,2	46

* MV=média;

** R=maior desvio da média (desvio padrão).

Comparando-se as Tabelas 5.2 e 5.3, é possível observar que a permeabilidade ao ar torna-se maior quando as amostras são secas, pois os tempos necessários para o equilíbrio de pressão e estabilização do fluxo são menores.

Apesar de algumas discussões sobre o método de Figg para a avaliação da permeabilidade de materiais à base de cimento, essa metodologia tem mostrado bons resultados no meio científico e empregada como norma interna de algumas instituições e laboratórios, como por exemplo, a documentação normativa E 413 do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Portugal) (BARROS, 2008).

Tabela 5.3 – Grupo de amostras 3-4: dimensão máxima do agregado de 32 mm (adaptado de PIHLAJAVAARA & PAROLL, 1975).

Classe de Resistência	Amostras	Valores estatísticos	Perm. ao ar (amostras não secas em estufa)	Amostras secas em estufa		Resistência à tração (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
				Perm. ao ar	Absorção de água		
25 MPa (a/c=0,75)	A1	MV* R**	76 s 66 s	11 s 08 s	25 s 42 s	1,8	24
	A2	MV R	92 s 156 s	11 s 07 s	28 s 28 s	2,0	24
	S1	MV R	204 s 314 s	06 s 04 s	13 s 23 s	1,7	23
	S2	MV R	135 s 313 s	11 s 18 s	19 s 35 s	1,8	22
45 MPa (a/c=0,42)	A1	MV R	178 s 129 s	14 s 25 s	60 s 195 s	2,6	45
	A2	MV R	160 s 265 s	17 s 12 s	127 s 211 s	2,7	47
	S1	MV R	179 s 129 s	26 s 07 s	174 s 228 s	2,9	45
	S2	MV R	106 s 128 s	18 s 19 s	133 s 377 s	2,6	43

*MV=média;

**R=maior desvio da média (desvio padrão).

5.4 Metodologia Thenoz

A metodologia proposta por Thenoz (1969) foi desenvolvida com o intuito de mensurar a permeabilidade ao ar de rochas e tem demonstrado bons resultados para a avaliação da permeabilidade ao ar do concreto (PERRATON, 1989; BODIN & ZAHARIEVA, 2002). De acordo com pesquisas realizadas, esse método tem sido aceito e apresentado como uma forma confiável de avaliar a permeabilidade ao ar de compósitos à base de cimento. Os resultados obtidos em pesquisas empregando o método de Thenoz foram satisfatórios em relação a resultados de outros métodos apresentados na literatura. (BODIN & ZAHARIEVA, 2002; PEREIRA, *et al.*, 2008; CAMARINI *et al.*, 2008; BARDELLA, 2005; PEREIRA & CAMARINI, 2011).

O método de Thenoz tem sido empregado para medir a permeabilidade do concreto, pelo fato do equipamento ser de fácil obtenção e pelo baixo custo com peças, aparelhos e montagem. Os equipamentos para medir a permeabilidade, geralmente, são bastante complexos e necessitam de inúmeros equipamentos, como manômetros, medidores digitais e válvulas controladoras de pressão (WATSON & OYEKA, 1981; MOREIRA *et al.*, 2002), o que gera elevados custos para obtenção e aquisição de equipamentos necessários.

O método de Thenoz consiste em medir a permeabilidade ao ar de meios porosos em função do tempo necessário para que o líquido contido em um tubo capilar desloque-se da altura h_0 até h_1 . O deslocamento do fluido durante o teste é ocasionado pela criação de um diferencial de pressão entre as duas faces da amostra, proporcionado pela movimentação vertical do líquido localizado no interior do tubo capilar. Por meio do gradiente de pressão criado, o ar é forçado a atravessar o interior dos poros da amostra. O equipamento para medir a permeabilidade pelo método de Thenoz é ilustrado na Figura 5.3.

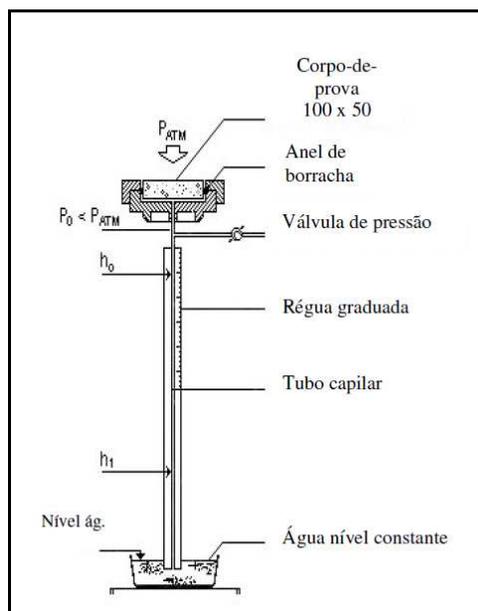


Figura 5.3 – Aparelho de ensaio de permeabilidade ao ar – Método de Thenoz (FERREIRA Jr., 2003).

A partir da determinação do tempo decorrido para que o líquido se desloque da altura h_0 até h_1 , utilização das características físicas do fluido permeante e da amostra utilizada, a

permeabilidade ao ar pode ser determinada por meio da Equação 5.4, a qual é embasada na Lei de Darcy.

$$k = \frac{\mu}{\rho \cdot g} \cdot \frac{s}{S} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \cdot \frac{l}{t} \quad \text{Equação 5.4}$$

Onde:

k = coeficiente de permeabilidade ao ar (m^2);

μ = viscosidade do ar na temperatura ambiente ($Pa.s$);

s = área de seção transversal do tubo capilar (m^2);

l = altura do corpo-de-prova (m);

ρ = massa específica do fluido utilizado no tubo capilar (Kg/m^3);

S = área de seção transversal da amostra (m^2);

h_0 = altura inicial (m);

h_1 = altura final (m);

t = tempo necessário para que o líquido desloque-se da altura h_0 até h_1 (s); e

g = aceleração da gravidade (m/s^2).

No entanto, a Equação 5.4 contém algumas modificações devido ao fluido permeante utilizado ser o ar, onde a forma diferencial original da equação de Darcy é integrada usando as condições apropriadas para o escoamento de gases, ou seja, empregando parâmetros pertinentemente aplicados em função da não variação da temperatura do fluido durante o ensaio e o condicionando de que o escoamento ocorra em estado estacionário. Além das modificações anteriormente citadas, a Equação 5.4 também desconsidera a variação da pressão do gás no decorrer do ensaio, pois perfil de velocidade do escoamento de líquidos é diferente do perfil de velocidade do escoamento de gases. A Equação 5.4 também desconsidera o diferencial de pressão existente ao longo da altura (L) perpendicular à área de seção transversal da amostra (DULLIEN, 1992).

Nas pesquisas realizadas para determinar a permeabilidade ao ar do concreto, por meio do método de Thenoz, Ferreira Jr. (2003) obteve valores em um intervalo de 120×10^{-19} a $180 \times 10^{-19} m^2$ em concretos submetidos em idades de 28, 90 e 180 dias com cura

realizada em ambiente de laboratório. No mesmo trabalho, em concretos cuja cura empregada foi a imersa, o intervalo de resultados obtidos para idades também de 28, 90 e 180 dias foi de aproximadamente, $15 \times 10^{-19} \text{ m}^2$. Bardella (2005) obteve valores de permeabilidade da mesma ordem de grandeza que os obtidos por Ferreira Jr. (2003). Nesse estudo, Bardella (2005) avaliou a permeabilidade do concreto em função do tipo de cimento empregando cura térmica. Os resultados de permeabilidade variaram entre, aproximadamente, $1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ e $7,5 \times 10^{-19} \text{ m}^2$.

Empregando também o método de Thenoz, Pereira e Camarini (2011) obtiveram valores de permeabilidade da décima terceira ordem de grandeza negativa (10^{-13}). Já Bodin e Zaharieva (2002), com o intuito de avaliar o tipo de cura na durabilidade de concretos convencionais e concretos preparados com agregados reciclados, obtiveram os resultados de permeabilidade do concreto, por meio do método de Thenoz, apresentados na Tabela 5.4. Os resultados obtidos nessa pesquisa apresentaram menores coeficientes de permeabilidade ao ar para concretos cujo tipo de cura empregada foi com água.

Tabela 5.4 – Permeabilidade *versus* tipo de cura (BODIN & ZAHARIEVA, 2002).

Tipo de concreto	Com agregados reciclados		Com parte de agregados reciclados		Concreto normal	
	ar	água	Ar	água	ar	água
Coeficiente de permeabilidade ao ar (10^{-18} m^2)	20,0	6,0	3,1	2,8	1,45	1,04

Devido ao método de Thenoz ter demonstrado resultados satisfatórios, quando foram realizadas avaliações fluido-dinâmicas na metodologia (PEREIRA & CAMARINI, 2011), esse trabalho tem o objetivo de avaliar a permeabilidade ao ar do concreto, assim como analisar a confiabilidade desses resultados, quando a metodologia de Thenoz é utilizada. Para isso foram estudados o número Reynolds e o número Mach do escoamento. Esse tipo de avaliação tem o intuito de tentar explicar a variabilidade de resultados de permeabilidade ao ar do concreto obtidos em diferentes pesquisas e verificar a confiabilidade dos resultados gerados quando emprega-se a metodologia proposta por Thenoz (BODIN & ZAHARIEVA,

2002; FERREIRA Jr. 2002; BARDELLA, 2005; PEREIRA *et al.*, 2008; PEREIRA & CAMARINI, 2011).

6

Metodologia e caracterização dos materiais

Neste capítulo são apresentados os materiais e a metodologia empregada no desenvolvimento do trabalho experimental.

6.1 Materiais

No trabalho experimental foram utilizados os seguintes materiais:

- Cimento Portland de alto-forno – CP III – 40;
- Agregado graúdo: origem da região de Campinas – SP;
- Agregado miúdo: areia natural de rio;
- Aditivo superplastificante.

Todos os materiais foram selecionados e armazenados adequadamente de forma a corresponder da melhor maneira possível ao trabalho experimental realizado. Os materiais empregados no experimento foram todos de um único lote.

6.1.1 Cimento Portland

No trabalho experimental os concretos foram preparados com cimento Portland de alto forno (CP III – 40), cujas propriedades físicas são apresentadas no Quadro 6.1.

Os ensaios de caracterização do cimento utilizado no trabalho experimental foram realizados segundo normas técnicas vigentes da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Propriedades		Norma (ABNT)
Finura (% retida na peneira # 200)	4,2	NBR 11579 (ABNT, 1991)
Finura Blaine (cm^2/g)	682,63	NBRNM 76 (ABNT, 1998)
Massa específica (g/cm^3)	2,99	NBRNM 23 (ABNT, 2003)
Tempo de início de pega (h:min)	2:57	NBRNM 65 (ABNT, 2003)
Tempo de fim de pega (h:min)	4:37	NBRNM 65 (ABNT, 2003)
Água da pasta de consistência normal (relação água/cimento)	0,31	NBRNM 43 (ABNT, 2003)

Quadro 6.1 – Propriedades físicas do cimento Portland (CP III – 40).

6.1.2 Agregados

No trabalho experimental foi utilizado como agregado miúdo areia natural de rio adquirida da região de Campinas – SP.

No agregado miúdo foram realizados ensaios de composição granulométrica – NBRNM 248 (2003a), massa específica – NBRNM 52 (2003b) e massa unitária – NBRNM 45 (ABNT, 2003c).

As propriedades físicas dos agregados foram determinadas por meio dos ensaios de distribuição granulométrica, segundo a NBRNM 248 (ABNT, 2003a), massa específica NBRNM 53 (ABNT, 2003d) e massa unitária – NBRNM 45 (2003e) (Quadro 6.2).

Agregado miúdo	Módulo de finura	2,53
	Dimensão máxima característica (mm)	2,4
	Massa específica (g/cm^3)	2,60
	Massa unitária (g/cm^3)	1,43
Agregado Graúdo	Módulo de Finura	8,34
	Dimensão Máxima Característica (mm)	19,0
	Massa específica (g/cm^3)	2,99
	Massa unitária (g/cm^3)	1,52

Quadro 6.2 Propriedades físicas dos agregados.

A Figura 6.1 apresenta a distribuição granulométrica do agregado miúdo e agregado graúdo utilizados na composição do concreto.

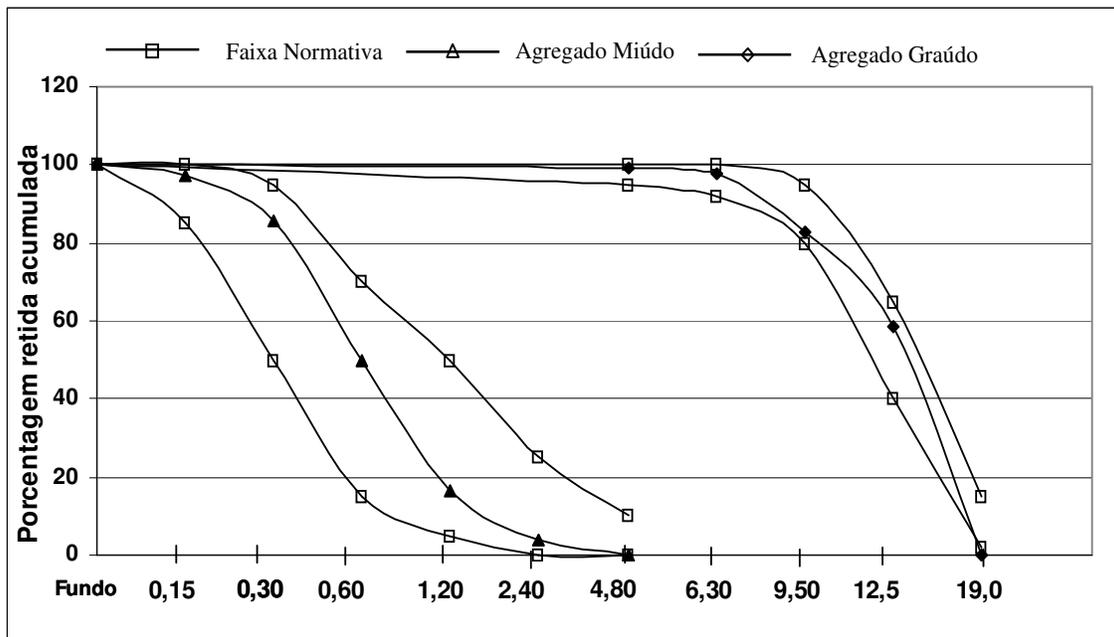


Figura 6.1 – Distribuição granulométrica dos agregados.

6.2 Misturas experimentais

O concreto utilizado no trabalho experimental adotou um proporção cimento:agregados, em massa, de 1:5. Os traços empregados (cimento:areia:brita e relação água/cimento) foram os seguintes:

- 1:2:3:0,42;
- 1:2:3:0,46;
- 1:2:3:0,50.

A quantidade de materiais empregada para a moldagem dos corpos-de-prova e consumo pode ser observada no Quadro 6.3.

Traço	Cimento (Kg)	Água (Kg)	Areia (Kg)	Brita (Kg)	Superplastificante (%)	Consumo de cimento (Kg/m³)
1:2:3:0,50	50	25	100	150	0	387,60
1:2:3:0,46	50	23	100	150	1	393,70
1:2:3:0,42	50	21	100	150	1	400,00

Quadro 6.3 – Especificação dos materiais utilizados no trabalho experimental.

Para as séries com relação água/cimento de 0,46 e 0,42 foram utilizados 1% de aditivo superplastificante, pois elas não apresentaram boa trabalhabilidade em função das relações água/cimento empregadas.

A proporção (cimento: areia: brita) 1:2:3 foi escolhida pois apresentou bom desempenho baseado em um pré-estudo de dosagem (Apêndice C).

O intuito da utilização de diferentes relações água/cimento foi observar o comportamento da permeabilidade ao ar do concreto em função da quantidade de água empregada na mistura.

Os ensaios de resistência à compressão axial, índice de vazios, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao ar do concreto foram realizados com os séries de amostras produzidas idades de 7 dias, 28 dias e 350 dias.

6.3 Moldagem e cura do concreto

As séries de concretos foram preparadas em betoneira de eixo inclinado e moldados corpos-de-prova de dimensões 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. O adensamento do concreto foi realizado em mesa vibratória. O preenchimento dos corpos-de-prova foi executado em duas camadas.

Após moldagem e adensamento, o concreto foi submetido a dois tipos de cura: cura ambiente e cura imersa.

Em seguida, são detalhados os procedimentos que foram adotados.

A nomenclatura das amostras utilizadas no trabalho experimental, o tipo de cura empregado, relação água/cimento e as idades de ensaios podem ser observadas no Quadro 6.4.

Amostra	Cura	Relação a/c (massa)	Idade (dias)
AMB1	Ambiente	0,42	7 dias, 28 dias, 350 dias
AMB2	Ambiente	0,46	7 dias, 28 dias, 350 dias
AMB3	Ambiente	0,50	7 dias, 28 dias, 350 dias
IM1	Imersa	0,42	7 dias, 28 dias, 350 dias
IM2	Imersa	0,46	7 dias, 28 dias, 350 dias
IM3	Imersa	0,50	7 dias, 28 dias, 350 dias

Quadro 6.4 – Séries de concreto produzidas.

6.3.1 Cura ambiente (AMB)

Os corpos-de-prova permaneceram nos moldes por 24 horas após a moldagem. Após esse período foram desmoldados e armazenados em ambiente de laboratório com, aproximadamente, 24 °C de temperatura e umidade relativa do ar de 70%. As amostras foram ensaiadas aos 7 dias, 28 dias e 350 dias, conforme pode ser observado no Quadro 6.4.

As amostras submetidas à cura ambiente são caracterizadas abaixo.

AMB1: Traço: 1:2:3:0,42

AMB2: Traço: 1:2:3:0,46

AMB3: Traço: 1:2:3:0,50

6.3.2 Cura imersa (IM)

Os corpos-de-prova foram desmoldados 24 horas após a moldagem e, em seguida, foram imersos em água potável saturada de hidróxido de cálcio até 24 horas antes da realização dos ensaios. As amostras foram ensaiadas aos 7 dias, 28 dias e 350 dias.

As amostras IM1, IM2 e IM3 foram ensaiadas aos 7 dias, 28 dias e 350 dias e as suas características são descritas abaixo.

IM1: Traço: 1:2:3:0,42

IM2: Traço: 1:2:3:0,46

IM3: Traço: 1:2:3:0,50

6.4 Ensaios realizados

A seguir serão descritos os ensaios realizados no trabalho experimental.

- Resistência à compressão axial;
- Índice de vazios;
- Absorção de água por capilaridade;
- Permeabilidade ao ar.

No Quadro 6.5 são mostradas as quantidades de amostras utilizadas para cada ensaio realizado. Para cada resultado foi realizada a média aritmética de 4 amostras.

Ensaio	Resistência à compressão axial	Índice de vazios	Absorção de água por capilaridade	Permeabilidade ao ar
Quantidade de amostras	4	4	4	4

Quadro 6.5 – Quantidade de amostras utilizadas para cada ensaio.

6.4.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência á compressão foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, segundo as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 1994) nas idades de 7, 28 e 350 dias.

6.4.2 Índice de vazios

Os ensaios de índice de vazios foram realizados segundo a NBR 9778 (ABNT, 2005). Para a determinação do índice de vazios, as amostras foram pesadas na condição seca (M_i) e na condição saturada (M_{sat}). Para a determinação da massa na condição seca, as amostras permaneceram 24 horas em estufa à temperatura de 50° C. A temperatura de 50 °C foi utilizada por não proporcionar modificações microestruturais no concreto e ter gerado bons resultados em outros estudos (FERREIRA Jr, 2003; BARDELLA, 2005). A determinação da condição seca foi obtida quando a amostra atingiu constância de massa. A massa na condição saturada foi determinada a partir da imersão, por 24 horas, da amostras em água. A massa imersa foi determinada por meio da pesagem das amostras imersas no interior da água. A Equação 6.1 ilustra o cálculo do índice de vazios do concreto.

$$I_v = \frac{M_i}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad \text{Equação 6.1}$$

Onde:

I_v = índice de vazios ou porosidade total (*expresso em porcentagem*);

M_{sat} = massa da amostra saturada em água (g);

M_i = massa inicial da amostra (massa seca da amostra) (g).

6.4.3 Absorção de água por capilaridade

Antes dos ensaios as amostras permaneceram em estufa por um período de 24 horas à temperatura de 50 °C. A temperatura de 50 °C foi utilizada pelos mesmos motivos do ensaio de determinação do índice de vazios do concreto. Para a realização dos ensaios de absorção de água por capilaridade, as amostras tiveram suas faces laterais impermeabilizadas para garantir que a ascensão capilar de água procedesse somente no sentido perpendicular à área da amostra em contato com a água, conforme pode ser observado na Figura 6.2. As amostras tiveram suas faces inferiores imersas 10 mm no interior da água.

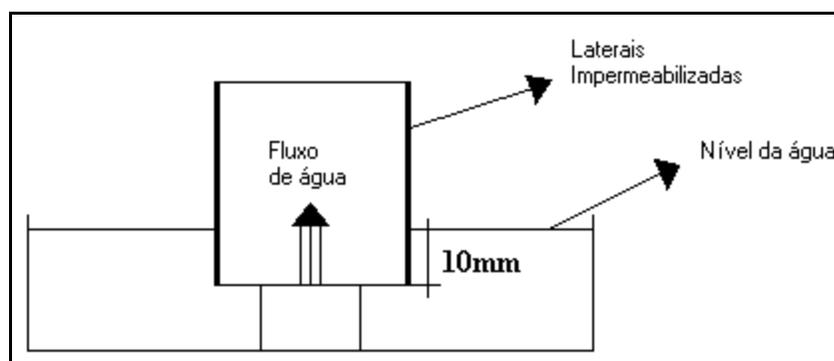


Figura 6.2 – Aparelho de ensaio de absorção de água por capilaridade.

Para os ensaios de absorção de água por capilaridade a amostra teve seu peso determinado após secagem em estufa, em seguida foi medido o peso da amostra em contato com a água quando decorridos 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 3 horas, 6 horas, 8 horas e 24 horas.

A absorção de água por capilaridade foi então determinada pela Equação 6.2.

$$C = \frac{A - B}{S} \quad \text{Equação 6.2}$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade (g/cm^2);

A = massa do corpo-de-prova que permanece em contato com a água durante o tempo especificado (g);

B = Massa do corpo-de-prova seco (g); e

S = área de secção transversal da amostra (cm^2).

6.4.4 Permeabilidade ao ar

Os ensaios de permeabilidade ao ar foram realizados segundo a metodologia proposta por Thenoz (1969) em corpos-de-prova cilíndricos. Para a realização dos ensaios de permeabilidade ao ar do concreto, foram cortadas amostras (100 mm x 50 mm) do centro dos corpos-de-prova cilíndricos (100 mm x 200 mm) e tiveram sua superfície lateral impermeabilizada com fita adesiva, conforme pode ser observado na Figura 6.3.

Para cada série dos resultados de permeabilidade ao ar foram utilizadas a média de quatro resultados de uma mesma série.

Antes da realização dos ensaios de permeabilidade ao ar do concreto, as amostras permaneceram 24 horas em estufa à temperatura de 50 °C.

O aparelho empregado para a determinação da permeabilidade ao ar do concreto é ilustrado na Figura 6.4.

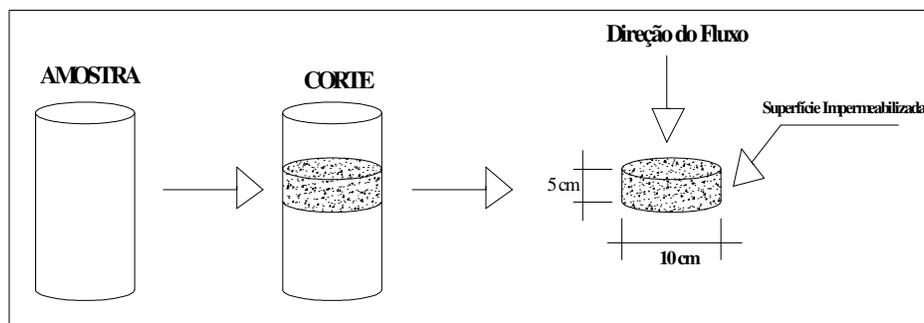


Figura 6.3 – Preparação das amostras para o ensaio de permeabilidade ao ar.

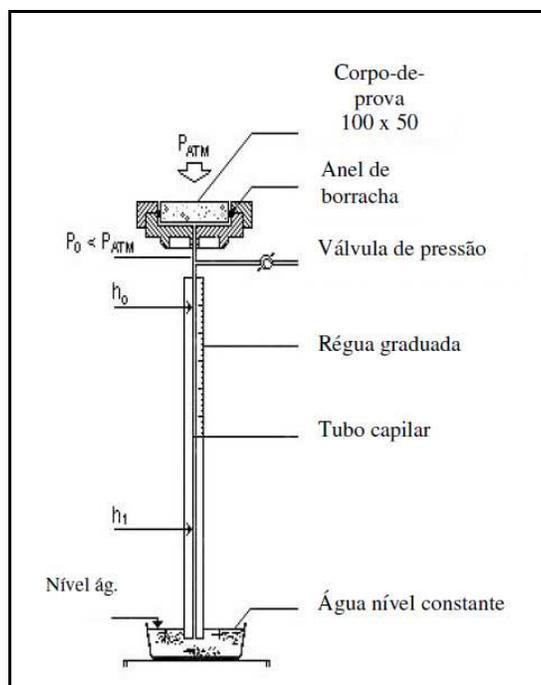


Figura 6.4 – Aparelho de ensaio de permeabilidade ao ar – Método de Thenoz (FERREIRA Jr., 2003).

A determinação da permeabilidade ao ar do concreto foi realizada em função do tempo em que o líquido contido no tubo capilar levou para deslocar-se da altura h_0 até a altura h_1 . Após a medição do tempo, a permeabilidade ao ar do concreto foi obtida por meio da Equação 5.4 (pág. 66).

$$k = \frac{\mu}{\rho \cdot g} \cdot \frac{s}{S} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \cdot \frac{l}{t} \quad \text{Equação 5.4}$$

Onde:

k = coeficiente de permeabilidade ao ar (m^2);

μ = viscosidade do ar na temperatura ambiente ($Pa \cdot s$);

s = área de seção transversal do tubo capilar (m^2);

l = altura do corpo-de-prova (m);

ρ = massa específica do fluido utilizado no tubo capilar (g/cm^3);

S = área de seção transversal da amostra (m^2);

h_0 = altura inicial (m);

h_1 = altura final (m);

t = tempo necessário para o líquido deslocar-se da altura h_0 até h_1 (s); e

g = aceleração da gravidade (m/s^2).

As alturas h_0 e h_1 forma determinadas por meio da igualdade da relação $\ln h_0/h_1=1$. Esta igualdade foi utilizada em função da mesma garantir que o escoamento ocorra laminarmente (YSSORCHE *et al.*, 1995). Dessa forma, fixou-se a altura h_0 30,8 cm e obteve-se a altura h_1 de 83,93 cm, por meio da relação $\ln h_0/h_1=1$.

6.5 Quadro de resumo

No Quadro 6.6 é apresentado o quadro de resumo da nomenclatura das amostras, assim como o número de amostras ensaiadas. São apresentadas também no Quadro 6.6, a quantidade de amostras ensaiadas para cada ensaio realizado: resistência à compressão axial, índice de vazios, absorção de água por capilaridade e de permeabilidade ao ar.

É possível observar, por meio do Quadro 6.6, que para obtenção dos resultados experimentais, foram ensaiados 288 corpos-de-prova de concreto.

Amostras	Cura	Relação a/c (massa)	Idade (dias)			RC*	IV**	Abs. Capilar	Perm. ao ar
AMB1	Ambiente	0,42	7	28	350	12	12	12	12
AMB2	Ambiente	0,46	7	28	350	12	12	12	12
AMB3	Ambiente	0,50	7	28	350	12	12	12	12
IM1	Imersa	0,42	7	28	350	12	12	12	12
IM2	Imersa	0,46	7	28	350	12	12	12	12
IM3	Imersa	0,50	7	28	350	12	12	12	12
* Resistência à compressão									
** Índice de vazios									

Quadro 6.6 – Quadro de resumo da quantidade de amostras e nomenclaturas empregadas no trabalho experimental.

7

Apresentação dos resultados e análises

Neste capítulo são discutidos e analisados os resultados experimentais obtidos por meio dos ensaios realizados. São avaliados os resultados de resistência à compressão, índice de vazios, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao ar do concreto. Todas essas propriedades são avaliadas em função da relação água/cimento, tipo de cura e idade de hidratação, assim como são realizadas correlações entre as propriedades descritas anteriormente. Nesse capítulo é analisado também o mecanismo de escoamento do fluido durante o ensaio de permeabilidade ao ar, por meio do número Mach e do número de Reynolds do escoamento, com o objetivo de avaliar, respectivamente, se durante o ensaio de permeabilidade ocorrem variações na massa específica do ar, assim como caracterizar o tipo de escoamento (laminar, transição ou turbulento).

7.1 Propriedades dos concretos

7.1.1 Resistência à compressão axial

Os resultados de resistência à compressão axial são apresentados na Figura 7.1 e Figura 7.2. Os resultados obtidos aos 350 dias foi superior aqueles ensaiados aos 28 dias e 7 dias (Figura 7.1), comprovando a tendência de contribuição da idade e do tempo de hidratação para o aumento da resistência à compressão do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

As amostras de concreto ensaiadas aos 350 dias (cura ambiente) obtiveram aumento na resistência à compressão de, em média, de 16%, se comparados às amostras com 28 dias de idade. As amostras, cuja cura empregada foi a imersa e com idade de 350 dias, tiveram

um aumento de 13,33 % na sua resistência à compressão quando comparadas às amostras avaliadas aos 28 dias.

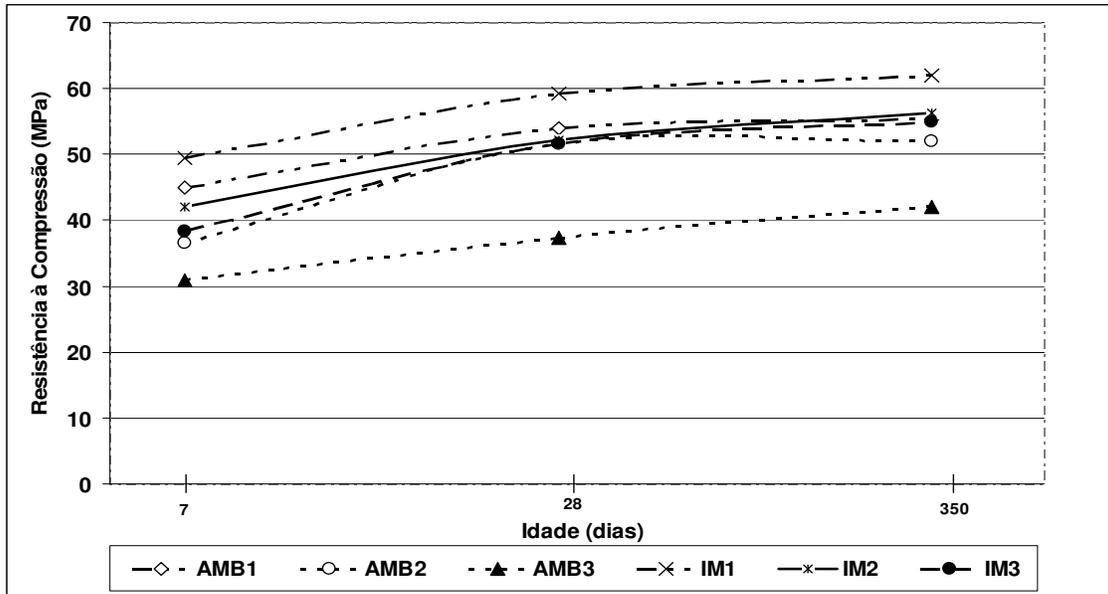


Figura 7.1 – Influência do tipo de cura na resistência à compressão axial do concreto.

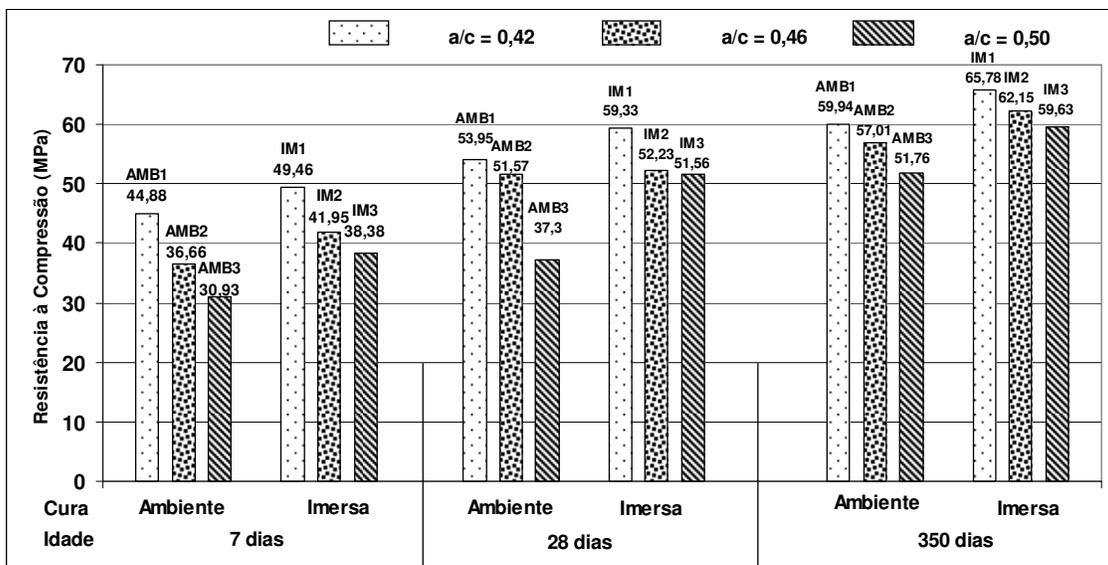


Figura 7.2 – Influência da relação água/cimento, cura e idade na resistência à compressão do concreto.

Para todas as amostras avaliadas, os resultados mostraram que a cura imersa, se comparada com a cura ambiente, proporcionou um aumento médio na resistência à

compressão do concreto de 14,03% para as amostras analisadas aos 7 dias, 12,66% para as amostras avaliadas aos 28 dias e de 10,11% para as amostras analisadas aos 350 dias. Avaliando os resultados de maneira global, foi possível observar que a cura imersa proporcionou um aumento da resistência à compressão de, aproximadamente, 12,26%, em relação aos concretos submetidos à cura ambiente.

O aumento da resistência à compressão axial do concreto devido ao emprego da cura imersa é proporcionado por uma maior retenção de água de hidratação no interior do concreto durante o mecanismo de hidratação dos compostos anidros do cimento presentes na sua pasta de cimento. Dessa maneira, os resultados obtidos puderam comprovar que o tipo de cura empregado pode influenciar na resistência à compressão do concreto, proporcionando concretos com melhores desempenhos mecânicos (CAMARINI, *et al.* 1999; CASCUDO, *et al.*, 2003).

Também é possível observar, por meio da Figura 7.2, que a relação água/cimento, da mesma forma que a idade e o tipo de cura, influenciou na resistência à compressão das séries de concretos analisadas. Os resultados obtidos mostraram que maiores relações água/cimento proporcionaram menores valores de resistência à compressão. Os valores mais significativos foram observados nas amostras AMB1 e AMB2 (7 dias de idade – cura ambiente), respectivamente com relações água/cimento de 0,46 e 0,42, onde a diminuição da relação água/cimento proporcionou um aumento de, aproximadamente, 22,42%, na sua resistência à compressão axial. Para as amostras IM1 e IM2 (7 dias – cura imersa), com relações água/cimento, respectivamente de 0,42 e 0,46, o aumento da relação água/cimento proporcionou um aumento na resistência à compressão de 13,59%.

O aumento da resistência à compressão devido à diminuição da relação água/cimento pode ser explicado por meio de um aumento do fator de empacotamento da microestrutura do concreto e, conseqüente, diminuição da sua porosidade (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

7.1.2 Índice de vazios

É possível observar, por meio da Figura 7.3, que a relação água/cimento influenciou nos valores de índice de vazios dos concretos produzidos. Os resultados mostraram que as séries de concretos com menores relações água/cimento obtiveram os menores valores de índice de vazios, comportando-se de maneira esperada. A maior variação dos resultados obtidos em função da variação da relação água/cimento foi o observado nas amostras AMB1 e AMB2 (7 dias – cura ambiente), onde o aumento da relação água/cimento de 0,42 (AMB1) para 0,46 (AMB2) proporcionou um aumento de, aproximadamente, 2,4 vezes no valor do índice de vazios.

Na avaliação do índice de vazios do concreto observou-se que a relação água/cimento, tipo de cura e idade de hidratação podem influenciar em suas propriedades no estado endurecido. Dessa maneira, considerando essa propriedade como sendo fator direto que pode influenciar em sua durabilidade, foi possível verificar que as variáveis, tais como, tipo de cura, idade de hidratação e relação água/cimento são fatores determinantes que podem comprometer a vida útil do concreto (NUNES & HELENE, 1998; SILVA *et al.*, 1999).

O tipo de cura também influenciou nos resultados do índice de vazios do concreto, isto é, para todas as séries produzidas, os concretos submetidos à cura imersa obtiveram menores resultados de índice de vazios do que aqueles cuja cura empregada foi a ambiente (Figura 7.3).

Os resultados obtidos demonstraram menores valores de índice de vazios para concretos submetidos à cura imersa, assim como puderam comprovar que uma cura mais prolongada pode diminuir a porosidade do concreto, podendo ocasionar na elevação da sua durabilidade. Se a premissa de que quase que a totalidade dos mecanismos de transporte ocasionadores da diminuição da vida útil do concreto ocorre por meio de seus poros capilares, concretos submetidos à cura imersa podem ser considerados como mais duráveis (GARBOCZI, 1990).

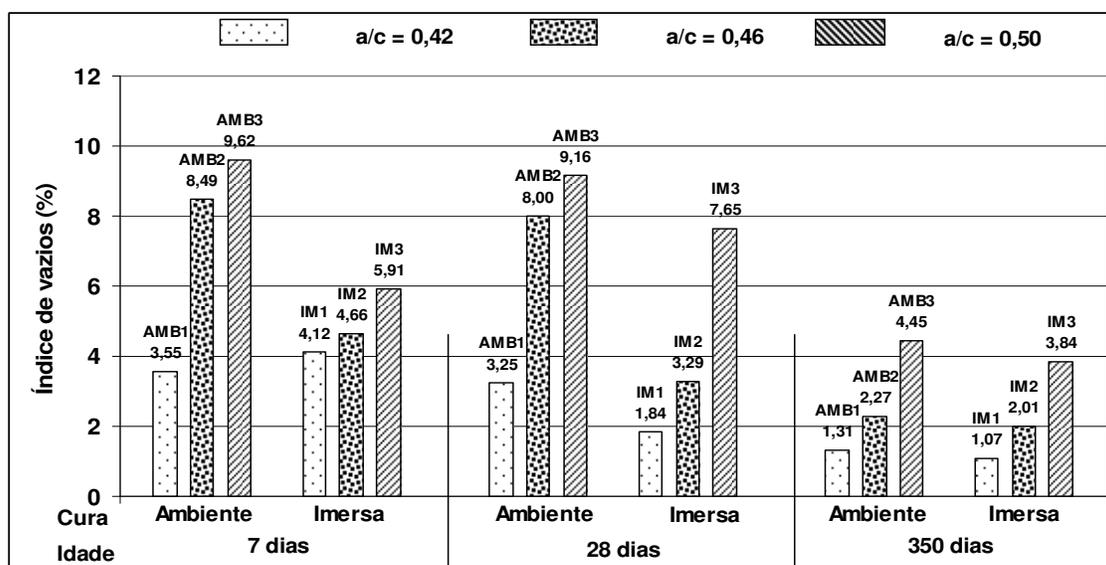


Figura 7.3 – Influência da relação água/cimento, tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.

7.1.3 Absorção de água por capilaridade

Os resultados de absorção de água por capilaridade obtidos mostraram que a idade influenciou nessa propriedade do concreto, conforme pode ser observado na Figura 7.4, Figura 7.5 e Figura 7.6, onde os resultados mostraram que os coeficientes de absorção de água por capilaridade foram menores para as séries de concreto ensaiadas aos 350 dias do que para as séries ensaiadas aos 28 dias e 7 dias.

A relação água/cimento também influenciou nos resultados de absorção de água por capilaridade das séries de concreto ensaiadas, onde a relação água/cimento de 0,42 obteve menores valores de absorção do que as relações água/cimento de 0,46 e 0,50, comportando-se conforme é observado na literatura (MEHTA & MONTEIRO, 2008; COUTO *et al.* 2003).

Para todas as amostras ensaiadas, os resultados mostraram que as amostras cuja cura imersa foi empregada apresentaram menores resultados de absorção de água por capilaridade do que quando as amostras foram submetidas à cura ambiente (Figura 7.4, Figura 7.5 e Figura 7.6), comprovando que o tipo de cura empregada pode influenciar na absorção de água do concreto (CAMARINI *et al.* 1999).

Conforme pode ser observado na Figura 7.4, a amostra AMB1 foi a que obteve um comportamento mais peculiar, pois apresentou o menor valor de absorção de água por capilaridade até, aproximadamente, às 3,5 horas iniciais de imersão, no entanto, no período compreendido entre 8 e 24 horas, o valor da absorção subiu, aproximadamente, 60%. Este comportamento pode ser explicado segundo à grande porosidade da amostra, que o grande diâmetro médio dos poros pode ocasionar em baixa força de sucção capilar no início do contato com a água, podendo fazer com o que a absorção de água por capilaridade fosse elevada somente quando ocorreu a saturação da amostra com o decorrer do tempo (COUTO *et al.*, 2003; NUNES & HELENE, 1998).

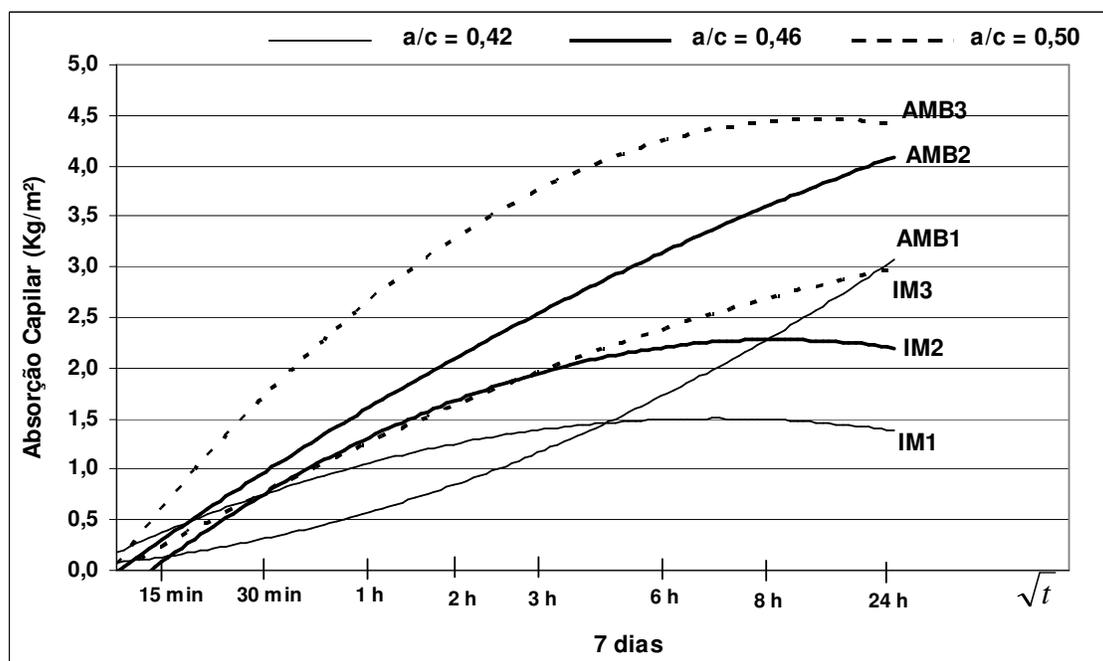


Figura 7.4 – Influência do tipo de cura, idade e relação água/cimento na absorção de água por capilaridade do concreto aos 7 dias de idade.

Com relação às amostras ensaiadas aos 28 dias (Figura 7.5), o comportamento mais distinto foi também o da amostra AMB1, onde até o tempo de 3,5 horas imersa, apresentou o maior valor de absorção de água por capilaridade, no entanto, no intervalo de tempo de 3,5 a 24 horas a curva se comportou quase que linearmente e às 24 de imersão, a amostra foi a que obteve o menor valor de absorção de sua série.

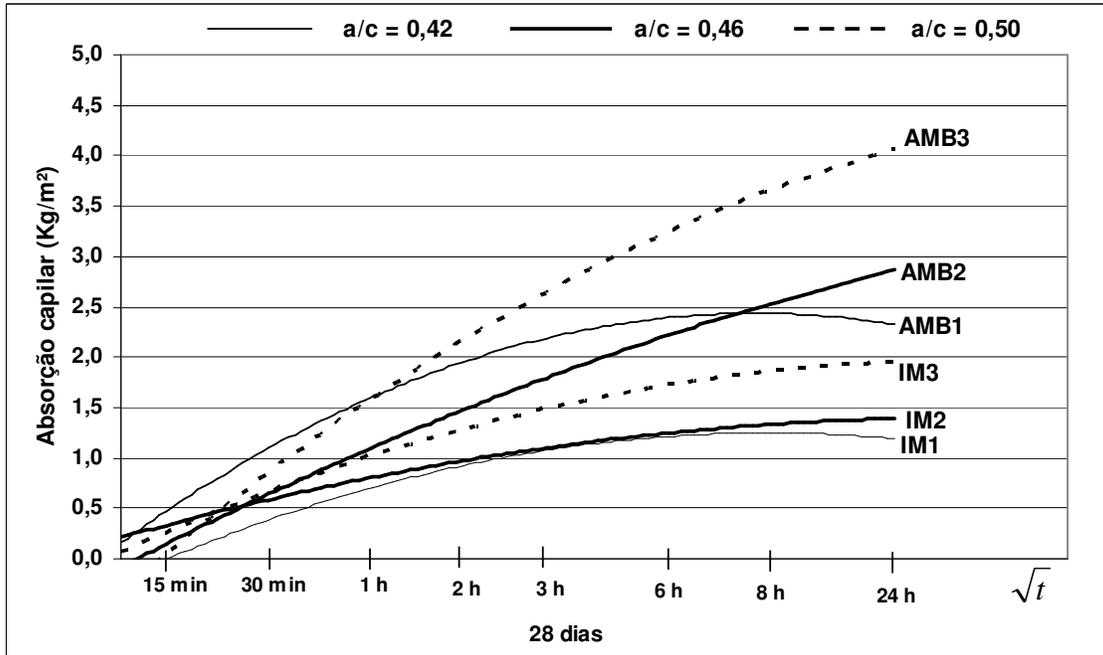


Figura 7.5 – Influência do tipo de cura, idade e relação água/cimento na absorção de água por capilaridade do concreto aos 28 dias de idade.

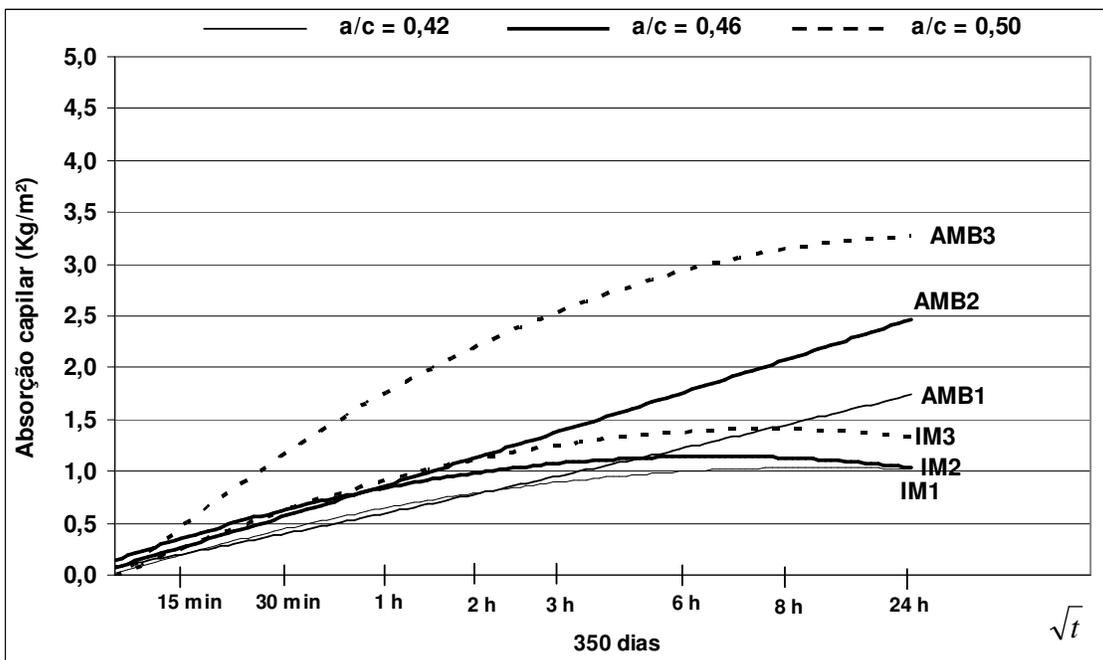


Figura 7.6 – Influência do tipo de cura, idade e relação água/cimento na absorção de água por capilaridade do concreto aos 350 dias de idade.

7.1.4 Relação entre resistência à compressão e absorção de água por capilaridade

Os resultados da relação entre resistência à compressão e absorção de água por capilaridade do concreto (Figura 7.7) apresentaram uma tendência conforme o observado na literatura (MEHTA & MONTEIRO, 2008), onde concretos com maiores resistências à compressão tendem a apresentar menores valores de absorção de água por capilaridade.

A correlação existente entre resistência à compressão e absorção capilar do concreto apresentou-se muito abaixo do esperado ($R^2 = 0,0764$), conforme pode ser observado na Figura 7.7. Esse comportamento foi obtido devido a uma grande dispersão dos pontos obtidos na correlação, apesar das propriedades relacionadas (resistência à compressão e absorção de água por capilaridade) serem duas propriedades inteiramente dependentes da porosidade do concreto (ODLER & RÖBLER, 1984).

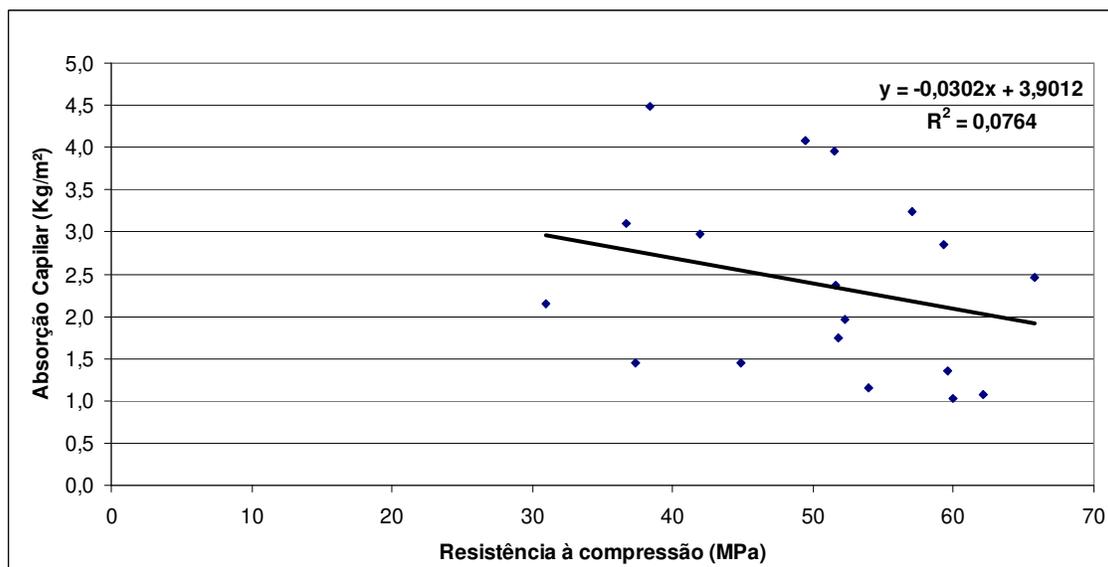


Figura 7.7 – Relação entre resistência à compressão e absorção de água por capilaridade.

7.1.5 Relação entre absorção de água por capilaridade e índice de vazios

A reta gerada por meio da correlação realizada entre o coeficiente de absorção de água por capilaridade e o índice de vazios das séries de concreto mostraram um comportamento linear, pois foi a expressão que mais se adaptou aos resultados obtidos (Figura 7.8).

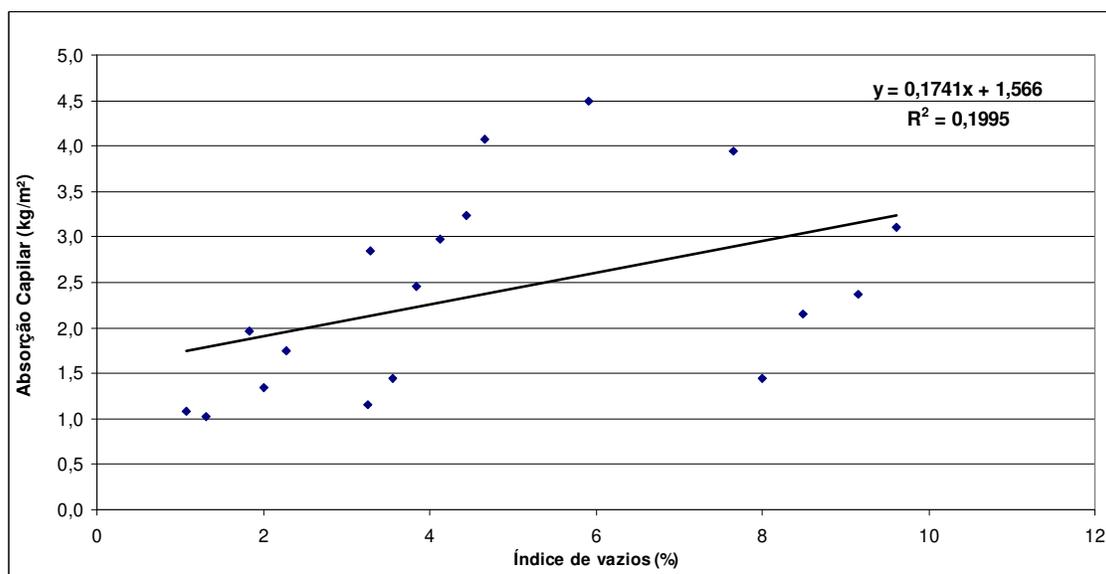


Figura 7.8 – Relação entre índice de vazios e absorção de água por capilaridade.

O resultado do coeficiente de correlação obtido entre a absorção de água por capilaridade e o índice de vazios também foi abaixo do esperado, onde o valor de R^2 foi de 0,1995. No entanto, o comportamento das retas (absorção versus índice de vazios) apresentou-se de forma esperada, ou seja, tendência de aumento da absorção de água por capilaridade com o aumento do índice de vazios.

As retas correspondentes à correlação entre o índice de vazios e a absorção de água por capilaridade das séries de concretos produzidas em idades de 7, 28 e 350 dias são apresentadas na Figura 7.9. As retas obtidas mostraram diferentes inclinações angulares, em função das idades do concreto avaliadas.

De acordo com a Figura 7.9, a reta correspondente às amostras ensaiadas aos 350 dias foi a que apresentou maior coeficiente angular, se comparada com as amostras ensaiadas aos 28 e 350 dias, assim como o maior coeficiente de correlação ($R^2 = 96,4\%$),

apresentando os resultados mais confiáveis. No entanto, os resultados obtidos para as amostras ensaiadas aos 28 dias apresentaram pouca variação da absorção de água por capilaridade em função do índice de vazios, resultados cujos quais apresentaram um baixo coeficiente de correlação ($R^2 = 0,0731$).

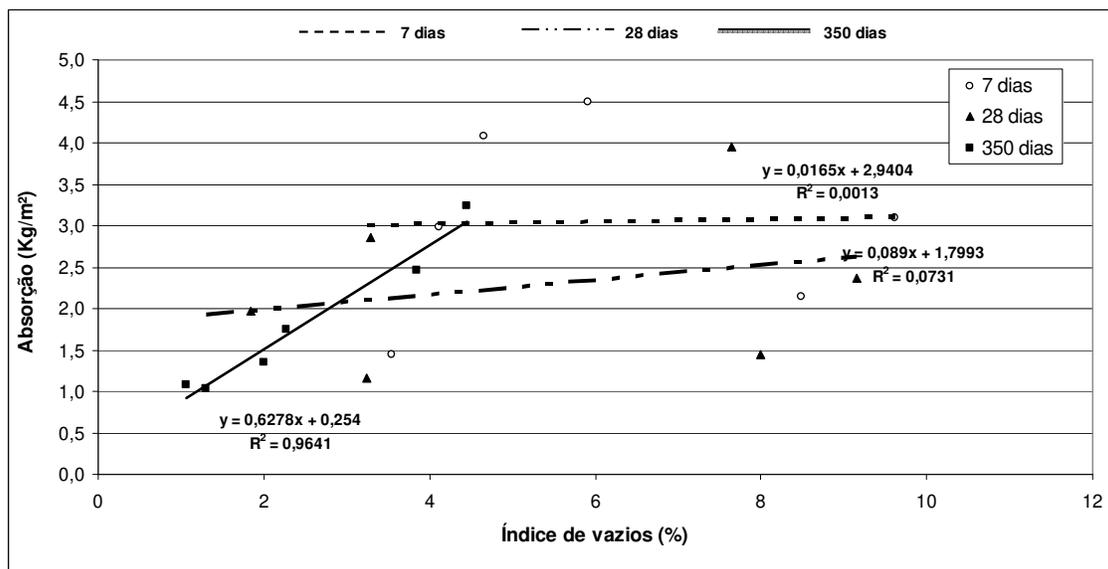


Figura 7.9 – Relação entre índice de vazios e absorção de água por capilaridade das amostras ensaiadas aos 7, 28 e 350 dias.

A correlação realizada com as amostras ensaiadas com 7 dias de idade também mostrou-se baixa ($R^2 = 0,0013$), apresentando o menor valor de todas as correlações absorção *versus* índice de vazios realizadas.

7.1.6 Permeabilidade ao ar

A partir dos resultados de permeabilidade ao ar obtidos foi possível observar que a relação água/cimento, idade e tipo de cura influenciaram na permeabilidade ao ar do concreto, onde menores relações água/cimento e maiores idades proporcionaram menores valores desta propriedade do concreto, assim como a cura imersa também apresentou tendência na diminuição da permeabilidade ao ar das séries de concretos produzidas, conforme pode ser observado na Figura 7.10.

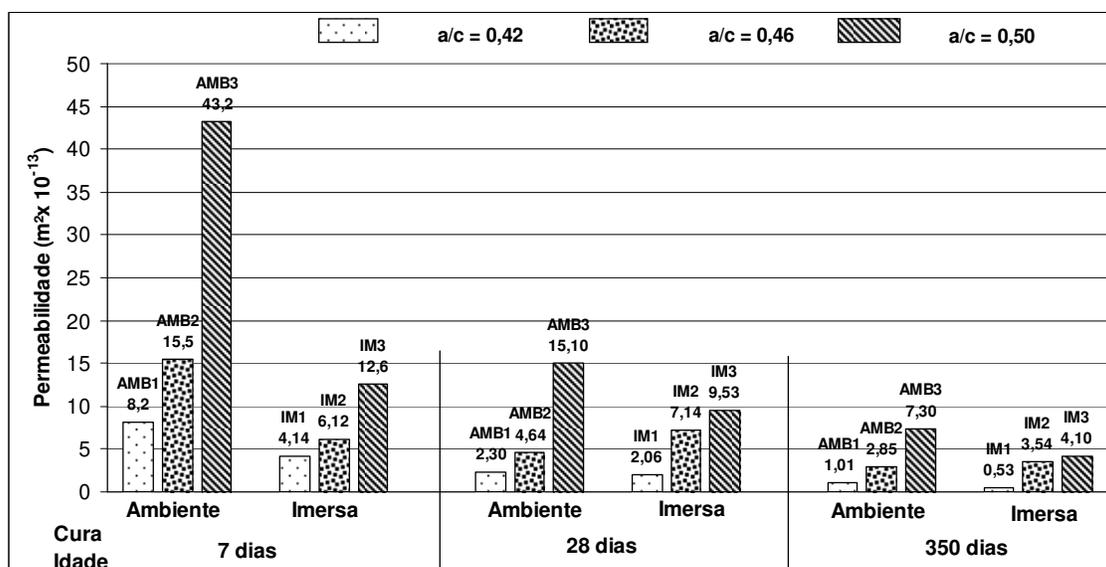


Figura 7.10 – Permeabilidade ao ar do concreto.

Os resultados obtidos mostraram que a variação da relação água/cimento acarretou em variações na permeabilidade ao ar do concreto, onde maiores relações água/cimento apresentaram uma tendência de aumento da permeabilidade ao ar do concreto.

Como é possível observar na Figura 7.10, a cura imersa proporcionou uma diminuição da permeabilidade ao ar do concreto em todas as séries analisadas. A maior influência pode ser observada na amostra IM3 (cura imersa – 7 dias), que teve o seu valor de permeabilidade diminuído em mais de 3 vezes, se comparada com a amostra cuja cura empregada foi a ambiente (AMB3).

A diminuição da permeabilidade do concreto ocasionada pela diminuição da relação água/cimento pode ser explicada em função de uma menor porosidade e maior empacotamento da microestrutura do concreto (NAIK & SINGH, 1994; BASHEER *et al.*, 2005; CZERNIN, 1963). A modificação da permeabilidade ao ar em função da relação água/cimento pode ter sido ocasionada também devido a alterações ocorridas na estrutura e inter-conectividade dos poros no interior do concreto proporcionada pela variação da relação a/c (OLLIVIER & MASSAT, 1992).

Na Figura 7.10 é possível observar que a idade do concreto também influenciou nos resultados de permeabilidade ao ar obtidos. A maior diferença foi observada entre a AMB3

avaliadas aos 7 dias e 28 dias, onde a idade de 28 dias proporcionou uma diminuição de, aproximadamente, 2,86 vezes os valores da permeabilidade ao ar do concreto, se comparada com a amostra ensaiada aos 7 dias.

Para as amostras analisadas, a idade de hidratação mostrou ser um importante fator que influencia nos resultados de permeabilidade ao ar do concreto, onde maiores idades de hidratação ocasionaram menores valores de permeabilidade ao ar, esse comportamento pode ser explicado em função de que concretos com maiores idades tendem a possuir uma maior quantidade de produtos hidratados em seu interior, diminuindo, assim, o número de poros permeáveis presentes em sua microestrutura (BROWN & SHI, 1989; SILVA 1995). Este preenchimento ocorre devido aos produtos hidratados da pasta de cimento ter um tamanho maior do que os grãos anidros do cimento (DHIR *et al.*, 1989). Assim, com o decorrer da idade, os poros vão sendo preenchidos por produtos hidratados e diminuindo, conseqüentemente, a porosidade e a permeabilidade do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Os resultados de permeabilidade ao ar obtidos foram da ordem da décima terceira grandeza exponencial negativa. Esses resultados, se comparados com os estudos realizados por meio do modelo de Katz-Thompson, apresentaram-se distintos, onde os resultados obtidos por esse modelo foram da nona (9) ordem de grandeza exponencial, segundo estudos realizados por Tumidajski e Lin (1998) (Tabela 5.1 – pág. 60).

Utilizando o método de Thenoz para medir a permeabilidade ao ar do concreto, Ferreira Jr (2003) obteve resultados em um intervalo de 120×10^{-19} a 180×10^{-19} m². A divergência dos resultados obtidos entre os de Ferreira Jr. (2003) e os observados na Figura 7.10 podem ter sido ocasionados pela metodologia adotada durante a preparação das amostras para a realização dos testes, pois as superfícies laterais das amostras foram impermeabilizadas de maneiras diferentes. Ferreira Jr (2003) impermeabilizou a superfície lateral das amostras com material químico impermeabilizante (resina) e no presente trabalho, a superfície lateral foi impermeabilizada com fita adesiva, a qual foi colada na superfície lateral da amostra.

Avaliando os resultados obtidos entre as pesquisas de Ferreira Jr (2003) e Bodin e Zaharieva (2002) (Tabela 5.4 – pág. 67), é possível observar que estes resultados encontram-se em uma faixa de valores mais próximos entre si, onde Ferreira Jr (2003) obteve resultados da décima nona ordem de grandeza exponencial negativa e Bodin e Zaharieva (2002) obteve resultados da décima oitava ordem de grandeza exponencial negativa. No entanto, os resultados também foram diferentes dos resultados de permeabilidade ao ar obtidos por Sugiyama (1996) que obteve resultados da décima sétima ordem de grandeza exponencial negativa, o que comprova a grande divergência nos resultados obtidos nesta propriedade do concreto.

De acordo com as conversões propostas por Whiting (1988), os resultados de permeabilidade obtidos nesse trabalho podem ser convertidos como exposto na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Conversão de unidades dos resultados de permeabilidade ao ar para Darcy, milidarcy (μ Darcy) e cm/s (permeabilidade hidráulica).

Amostras	Idade	$m^2 \times 10^{-13}$	Darcy	μ Darcy	cm/s (10^{-4})
AMB1	7 dias	8,20	0,828	828,20	7,96
AMB2	7 dias	15,50	1,565	1565,50	15,1
AMB3	7 dias	43,20	4,363	4363,20	41,9
IM1	7 dias	4,14	0,418	418,14	4,0
IM2	7 dias	6,12	0,618	618,12	5,9
IM3	7 dias	12,80	1,292	1292,80	12,4
-	-	-	-	-	-
AMB1	28 dias	2,30	0,232	232,30	2,2
AMB2	28 dias	4,64	0,468	468,64	4,5
AMB3	28 dias	15,10	1,525	1525,10	14,6
IM1	28 dias	2,06	0,208	208,06	2,0
IM2	28 dias	7,14	0,721	721,14	6,9
IM3	28 dias	9,53	0,963	962,53	9,3
-	-	-	-	-	-
AMB1	350 dias	1,01	0,102	102,01	0,981
AMB2	350 dias	2,05	0,207	207,05	1,991
AMB3	350 dias	7,30	0,737	737,30	7,088
IM1	350 dias	0,53	0,053	53,53	0,515
IM2	350 dias	7,54	0,761	761,54	7,321
IM3	350 dias	4,10	0,414	414,10	3,981

Os resultados obtidos no presente trabalho apresentaram-se maiores do que a faixa de valores do trabalho realizado por Whiting (1988), onde os resultados de permeabilidade ao ar variaram entre 28 e 270 μ Darcy. No entanto, no trabalho realizado por Whiting (1988), os resultados de permeabilidade ao ar não demonstraram tendências lógicas, pois o aumento da idade do concreto, em alguns casos, proporcionou aumento dos valores da sua permeabilidade, assim como ocorreu aumento da permeabilidade com a diminuição da relação água/cimento em algumas amostras.

7.1.7 Relação entre permeabilidade ao ar e resistência à compressão

A análise realizada entre resistência à compressão e permeabilidade ao ar do concreto mostrou-se condizente com o que pode ser observado na literatura, onde a permeabilidade do concreto apresentou tendência de diminuição com o aumento da resistência à compressão (Figura 7.11) (FERREIRA Jr, 2003; METHA, 2008; PIHLAJAVAARA & PARROL, 1975).

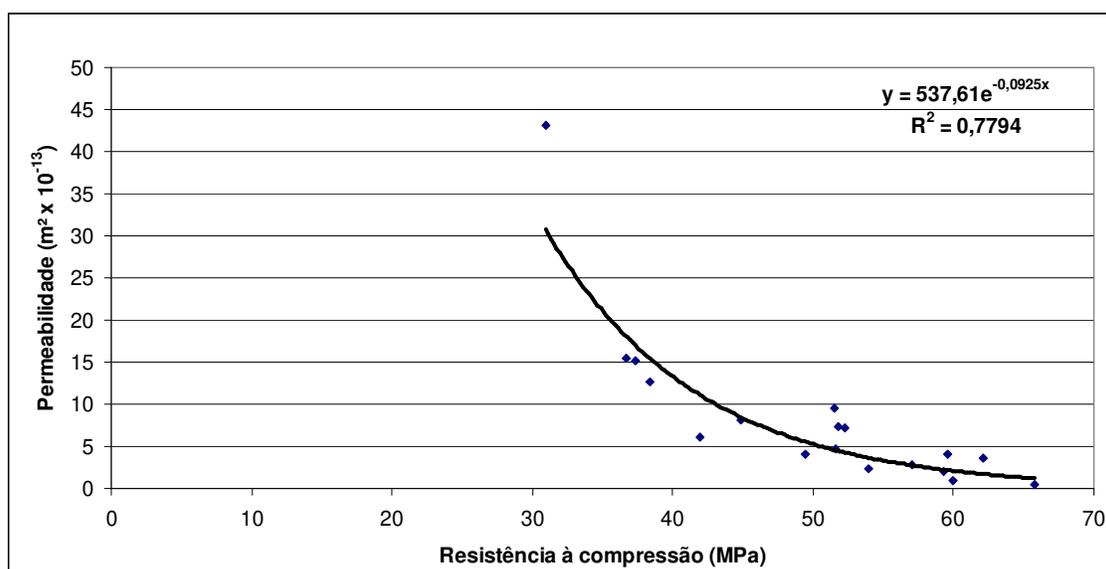


Figura 7.11 – Relação entre resistência à compressão axial e permeabilidade ao ar do concreto.

Para a correlação entre a resistência à compressão e permeabilidade ao ar do concreto obteve-se um coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,7794.

7.1.8 Relação entre índice de vazios e permeabilidade ao ar

Os resultados da relação entre o índice de vazios e permeabilidade ao ar do concreto são apresentados na Figura 7.12. Por meio dos resultados obtidos é possível observar a relação direta e proporcional existente entre essas propriedades do concreto, onde os valores da permeabilidade mostraram diminuir com a diminuição do índice de vazios.

Apesar do índice de vazios do concreto e sua permeabilidade serem propriedades correlatas e de relações diretas, a permeabilidade do concreto não é uma simples função do seu índice de vazios, pois a permeabilidade depende do tamanho, distribuição, forma, tortuosidade e conectividade dos poros presentes na microestrutura do concreto (TSIVILIS *et al.*, 2003).

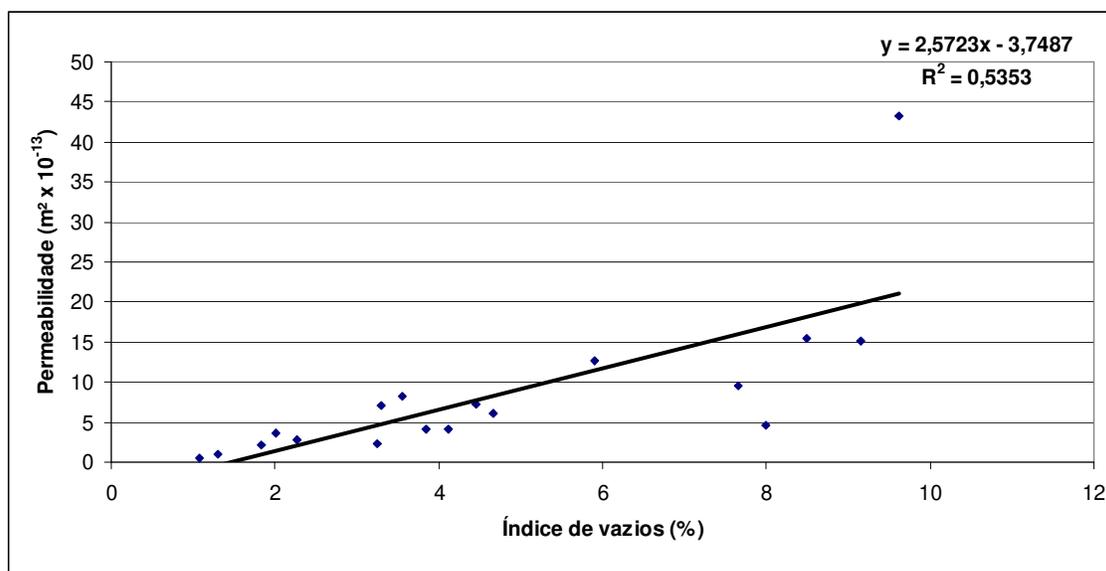


Figura 7.12 – Correlação entre índice de vazios e permeabilidade ao ar do concreto.

7.1.9 Relação entre absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao ar

A relação entre absorção de água por capilaridade e permeabilidade do concreto é apresentada na Figura 7.13, onde os resultados mostraram uma tendência de aumento da permeabilidade ao ar do concreto com o aumento do seu coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Parâmetros que relacionam propriedades de transporte de fluidos no concreto são importantes no estudo desse material, pois correlações desse tipo podem ser úteis para determinar e/ou estimar outras propriedades similares, de acordo com a conveniência e necessidade.

A realização de correlações entre a absorção de água por capilaridade e permeabilidade do concreto podem ser feitas devido a estas duas propriedades dependerem, quase que exclusivamente, da porosidade e conectividade dos poros da sua microestrutura e estudos desse tipo têm demonstrado relações estritas entre propriedades dependentes da porosidade do concreto (SUGIYAMA *et al.*, 1996).

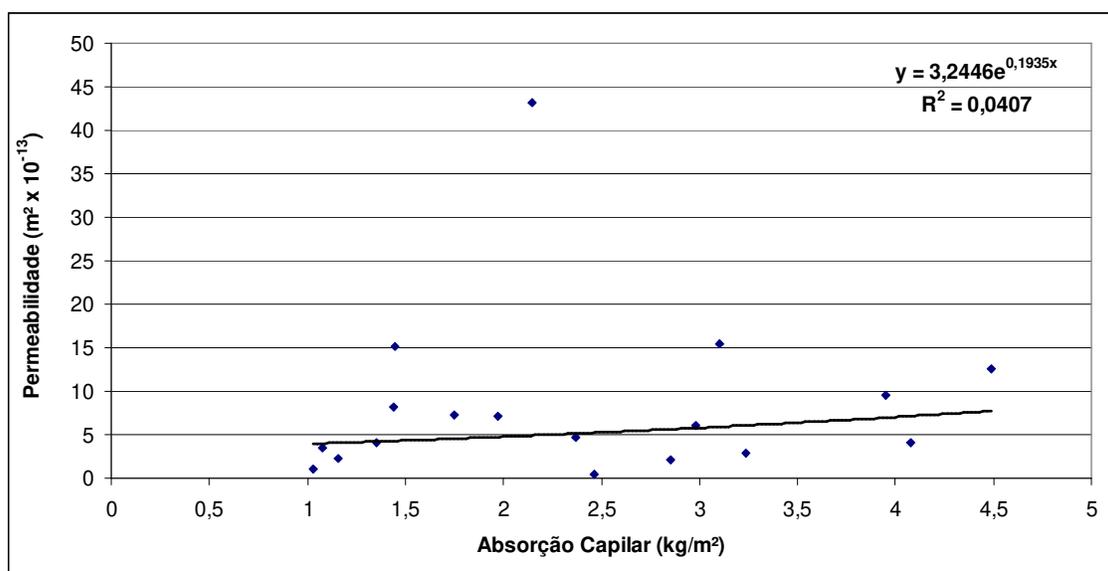


Figura 7.13 – Correlação entre absorção capilar e permeabilidade ao ar do concreto.

7.2 Mecanismo de escoamento no ensaio de permeabilidade ao ar do concreto – Número Mach, número Reynolds e cálculo da diferença de pressão

A avaliação do mecanismo de escoamento durante o ensaio de permeabilidade ao ar do concreto foi realizada por meio da análise dos resultados obtidos velocidade, número Mach e número Reynolds do escoamento, assim como o cálculo da diferença de pressão existente entre o início e o fim do ensaio de permeabilidade ao ar, de acordo com os conceitos clássicos e consagrados de fenômenos de transporte.

Devido ao grande número de divergências encontradas, recomenda-se que estudos mais aprofundados sejam realizados, pois trata-se do início de um estudo nesse tipo de material, como também devido às grandes disparidades observadas no meio científico mundial para a realização desse tipo de avaliação.

7.2.1 Velocidade do escoamento

O cálculo da velocidade do escoamento foi realizado em função da permeabilidade do material, conforme pode ser observado na Equação 7.1.

$$V = -\frac{k \Delta P}{\mu L} \quad \text{Equação 7.1}$$

Com a utilização do Equação 7.1, os resultados de velocidade do escoamento obtidos mostraram haver uma tendência da diminuição da velocidade com a diminuição da relação água/cimento, aumento da idade do concreto, assim como, quando a cura imersa é empregada. Esse comportamento pode ser explicado devido ao material ter uma menor permeabilidade e o tempo do mecanismo de transporte de fluidos no interior do concreto ser maior (Figura 7.14).

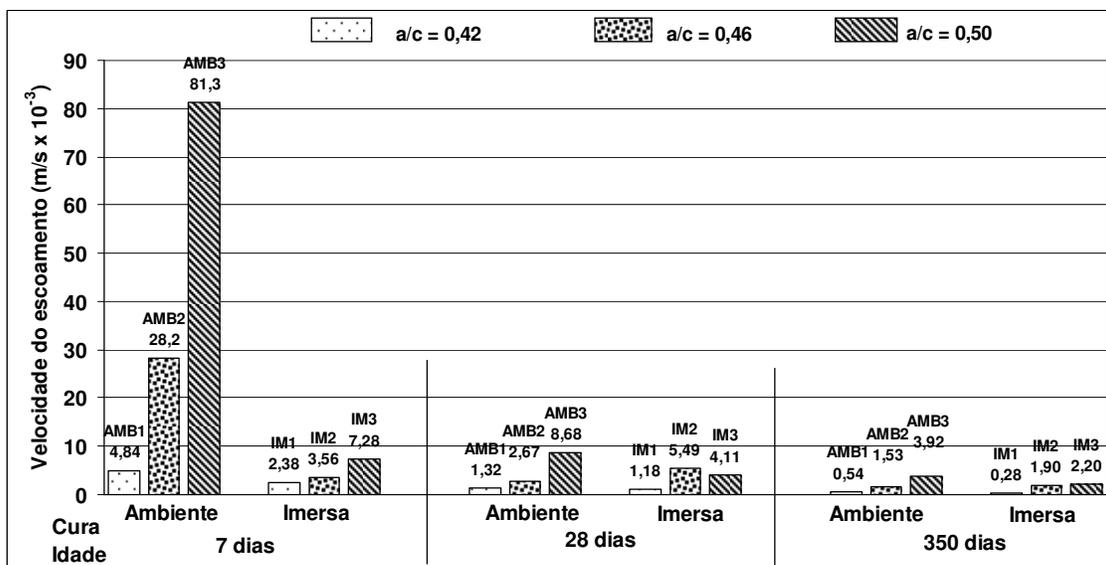


Figura 7.14 – Velocidade média do escoamento.

A velocidade de escoamento de fluidos no interior de concreto é um parâmetro importante, pois a maior ou menor facilidade de ingresso de fluidos para o interior de sua microestrutura é um dos principais fatores que ditam a sua durabilidade (BASHEER *et al.*, 2005).

Por meio da Equação 3.12 (pág. 41) e resultados obtidos por meio dessa, foram calculados os resultados de velocidade média do ar no interior dos poros do concreto, onde o cálculo da velocidade média do escoamento no interior dos poros do concreto foi realizado por meio da relação entre a velocidade do escoamento e o índice de vazios do concreto, conforme a Equação 3.12 (pág. 38).

$$V_p = \frac{V}{\varepsilon} \quad \text{Equação 3.12}$$

O índice de vazios do concreto foi considerado como sendo a sua porosidade. Os resultados de velocidade do escoamento de ar no interior do concreto são apresentados na Figura 7.15.

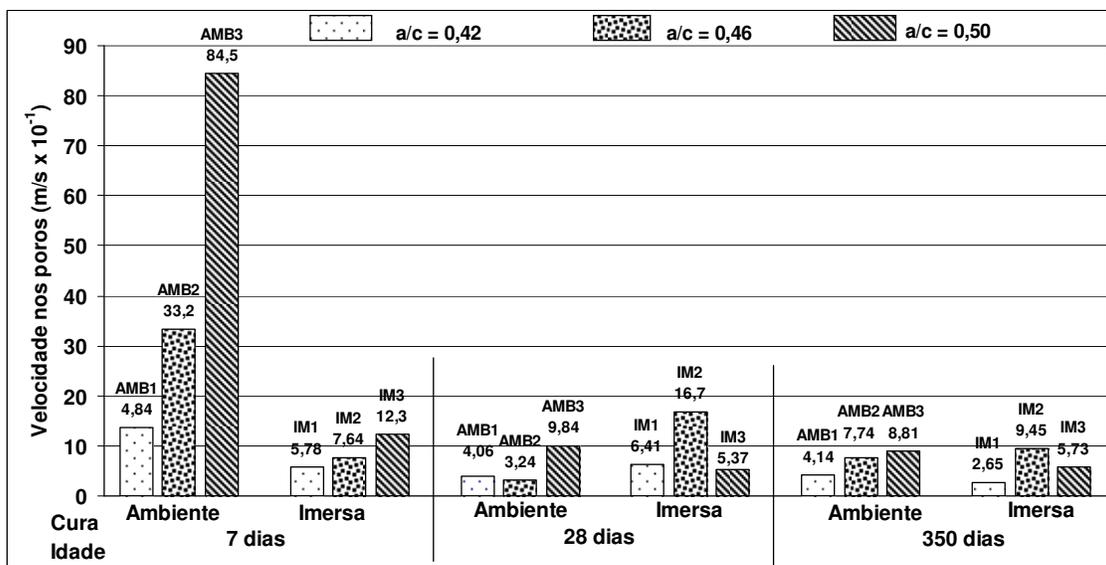


Figura 7.15 – Velocidade média do escoamento no interior dos poros.

A comparação entre os valores da velocidade do escoamento e a velocidade do escoamento no interior dos poros do concreto (Figura 7.14, Figura, 7.15) apresenta, por meio dos resultados obtidos e considerações realizadas, que houve uma diferença de duas ordens de grandeza exponenciais, comprovando a influencia da porosidade capilar do concreto nos valores da taxa de ingresso e movimentação de fluidos em seu interior.

A diferença entre os resultados obtidos de velocidade do escoamento e velocidade do escoamento no interior dos poros do concreto pode ser justificada devido à consideração que o escoamento de ar somente ocorre nos poros capilares do concreto, pois os valores de velocidade do escoamento foram calculados em função da permeabilidade do concreto. No cálculo da permeabilidade, a área de secção transversal da amostra foi utilizada no equacionamento, no entanto; o escoamento de ar ocorre somente em seus poros capilares, portanto, segundo Vennard e Strett (1978) o cálculo da velocidade do escoamento de fluidos no interior dos poros deve ser realizado por meio da relação entre a velocidade do escoamento e a porosidade do material, o que pode gerar resultados mais próximos do real, conforme exposto e comprovado pelos resultados obtidos nesse trabalho.

A velocidade do escoamento de ar no interior dos poros do concreto pode ser realizada também em função da relação entre a vazão pela área de secção transversal da amostra, área cuja qual permite o escoamento (Figura 7.16).

Os resultados mostrados na Figura 7.16 são os resultados da velocidade de ar no interior dos poros do concreto e foram obtidos por meio do cálculo entre a vazão do escoamento e a área de secção transversal responsável pelo escoamento.

Para a obtenção dos resultados apresentados na Figura 7.16 foi calculada a vazão do escoamento, por meio do volume de ar contido no tubo capilar, referente à diferença de altura h_0 e h_1 da relação $\ln h_0/h_1 = l$. A partir da determinação do volume de ar calculado contido no tubo capilar do aparato experimental utilizado no ensaio de permeabilidade ao ar e tempo para que o volume desloque-se entre as distâncias h_0 e h_1 foi calculada a vazão do escoamento, conforme pode ser observado na Equação 7.2.

$$Q = \frac{V_{h_0 \rightarrow h_1}}{t_{h_0 \rightarrow h_1}} \quad \text{Equação 7.2}$$

Onde:

Q = Vazão do escoamento (m^3/s);

V = volume de ar no tubo capilar entre as distâncias h_0 e h_1 (m^3);

t = tempo (s).

A partir da determinação da vazão (Q) do escoamento, a velocidade foi calculada a partir da Equação 7.3, onde a área de secção transversal (A) responsável pelo escoamento de ar foi calculada a partir do produto da área de secção transversal da amostra e o seu índice de vazios. Dessa forma, a área responsável pela vazão de ar foi considerada proporcionalmente à porosidade da amostra.

$$V = \frac{Q}{A} \quad \text{Equação 7.3}$$

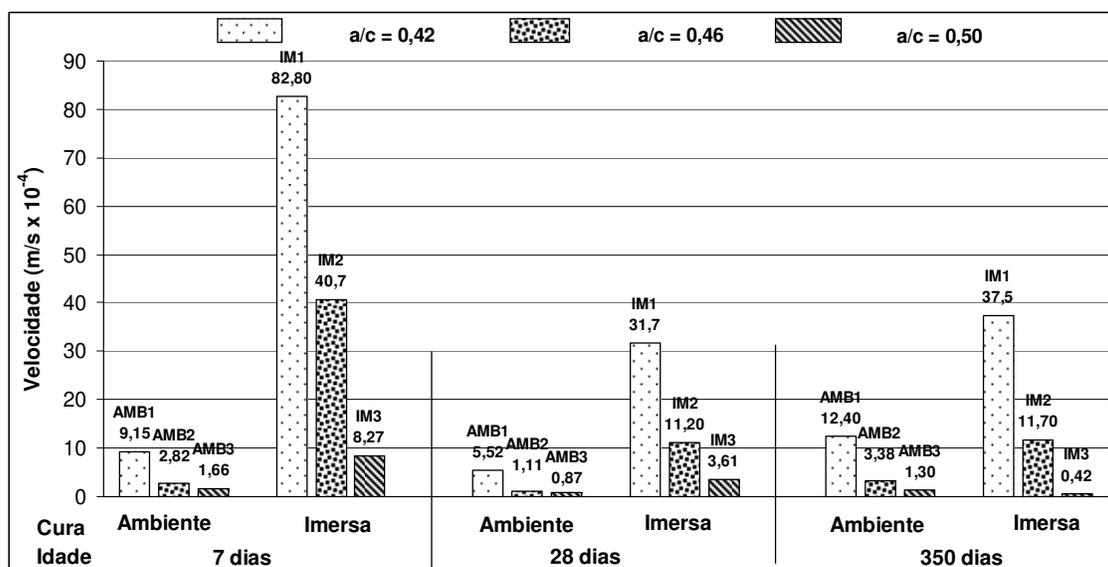


Figura 7.16 – Velocidade média do escoamento no interior dos poros.

De acordo com a Figura 7.16, pode ser observado que há uma tendência de aumento da velocidade quando a relação água/cimento também aumenta. Esse comportamento pode ser explicado devido à menor porosidade capilar do material, ocasionando uma diminuição da área responsável pelo escoamento de ar no interior do concreto.

Os resultados apresentados na Figura 7.16, se comparados aos apresentados na Figura 7.14 e Figura 7.15 apresentaram divergências de tendências. Isso pode ser explicado devido à metodologias empregadas para o cálculo da velocidade do escoamento serem diferentes. Como pode ser observado, os valores de velocidade apresentados na Figura 7.16 demonstram uma tendência de diminuição quando a relação água/cimento e idade são aumentadas. No entanto, os valores apresentados na Figura 7.14 e Figura 7.15 apresentam tendência de aumento dos valores de velocidade quando a relação água/cimento e idade aumentaram.

Devido ao grande número de considerações utilizadas e divergências encontradas nos resultados de velocidade do escoamento, recomenda-se que um número maior de pesquisas sejam realizadas, pois os estudos nessa área ainda são recentes, fazendo com que, dessa forma, sejam necessários um número maior de ensaios e avaliações para que resultados possam ser avaliados e comparados.

7.2.2 Variação de pressão

7.2.2.1 Número Mach do escoamento

O número Mach (M) do escoamento foi calculado por meio da razão entre a velocidade média do escoamento (V) com a velocidade média do som no fluido permeante (ar), como pode ser observado na Equação 3.16 (pág. 43).

$$M = \frac{V}{c} \quad \text{Equação 3.16}$$

Onde:

c = velocidade média do som no ar (300 m/s).

O número Mach é um índice que caracteriza a variação da massa específica durante um escoamento. O parâmetro empregado para essa determinação pode ser considerado o descrito abaixo (LISBOA, 2001):

- **Mach < 0,3**: não há variação da massa específica do fluido.
- **Mach > 0,3**: a variação da massa específica deve ser considerada no equacionamento que caracteriza a permeabilidade do material.

Os valores do número Mach (M) apresentados na Figura 7.17 foram calculados em função das considerações da velocidade do escoamento realizadas no item 7.2.1. Para os resultados de número Mach do escoamento, os resultados mostraram que para todas as amostras avaliadas, não houve descompressão do ar durante o ensaio de permeabilidade ao ar do concreto, pois os valores obtidos foram da ordem da quinta ordem grandeza exponencial negativa, conforme pode ser observado na Figura 7.17.

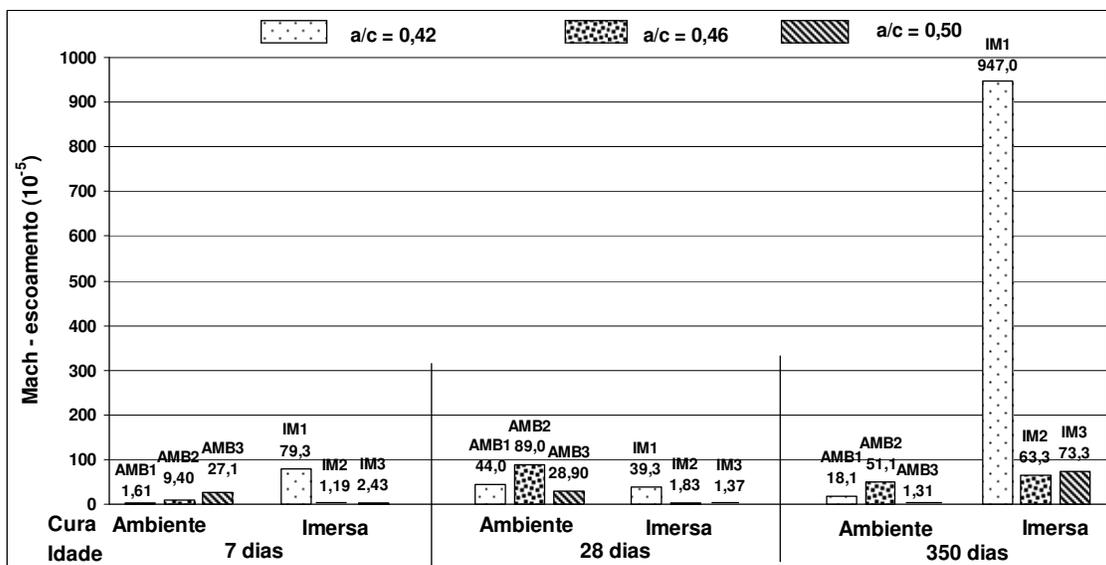


Figura 7.17 – Número Mach do escoamento.

Para o número Mach avaliado em função da velocidade do escoamento no interior dos poros (Equação 3.12 – pág. 41), os resultados mostraram que durante o escoamento também não há descompressão do ar durante o ensaio de permeabilidade ao ar (Figura 7.18). No entanto, os valores encontrados foram duas ordens de grandeza exponenciais maiores do que os resultados obtidos na Figura 7.18 e de uma ordem de grandeza exponencial maior do que os valores obtidos na Figura 7.19.

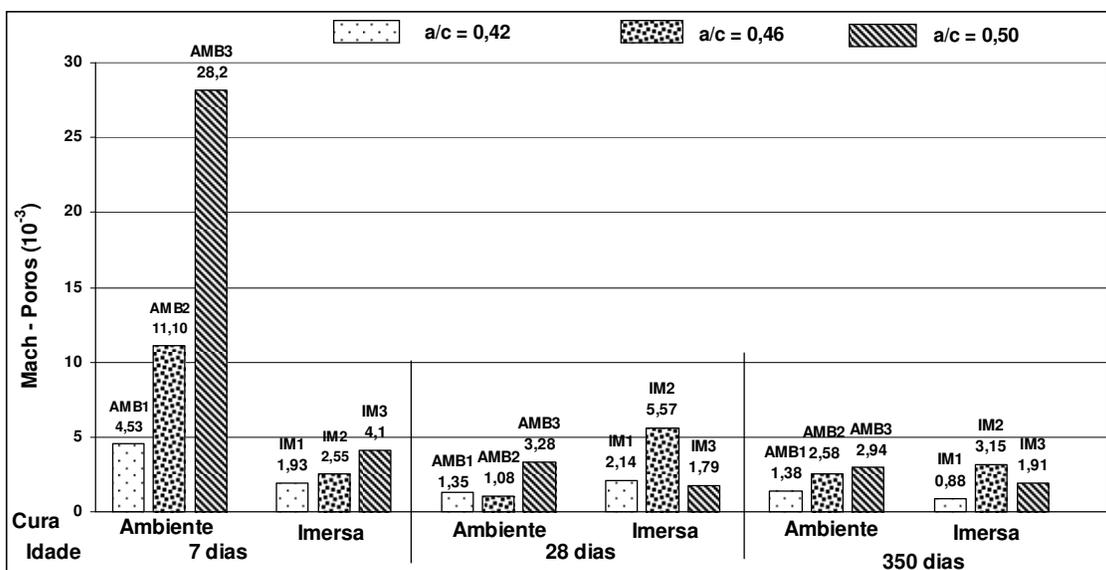


Figura 7.18 – Número Mach do escoamento no interior dos poros.

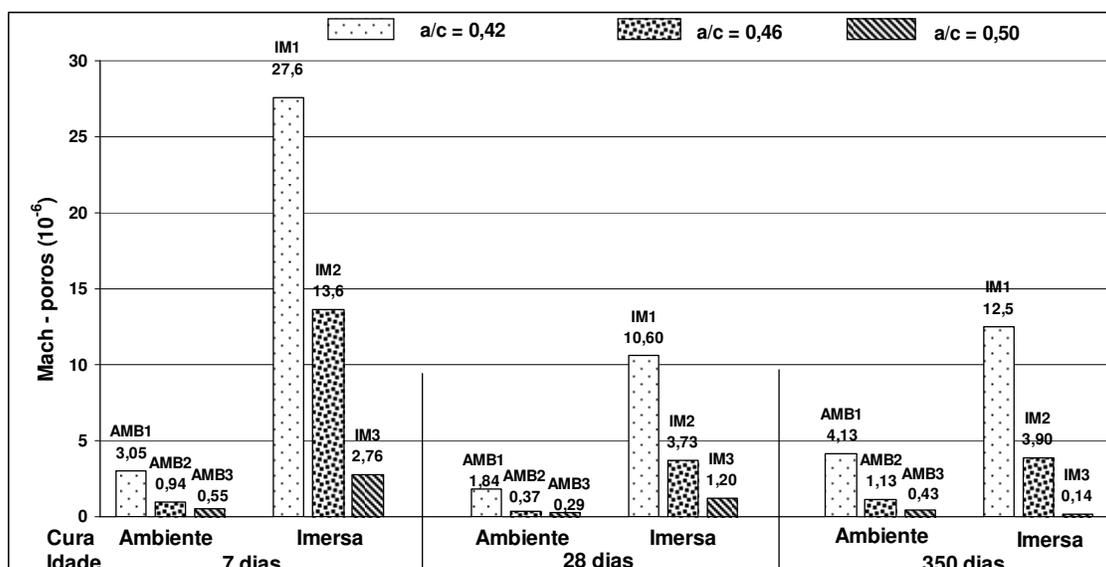


Figura 7.19 – Número Mach do escoamento nos poros.

Os resultados do número Mach obtidos, por meio da consideração realizada na Equação 7.5, mostraram que os resultados foram da mesma ordem de grandeza exponencial apresentados na Figura 7.17. No entanto, os valores foram divergentes entre si. Os resultados obtidos também mostraram que o escoamento pode ser caracterizado como incompressível.

Para todos os resultados de número Mach obtidos, indiferente às considerações realizadas, foi possível observar que, utilizando o número Mach como parâmetro de avaliação da pressão no ensaio, o mecanismo de escoamento no concreto pode ser considerado como incompressível, pois todos os resultados obtidos foram inferiores a 0,3 (LISBOA, 2001).

7.2.2.2 Cálculo teórico da diferença de pressão no ensaio de permeabilidade ao ar do concreto

Com o intuito de quantificar a diferença de pressão durante o ensaio de permeabilidade, foi realizado o cálculo teórico, empregando-se os princípios básicos de fenômenos de transporte.

De acordo com o esquema ilustrado na Figura 7.20, temos:

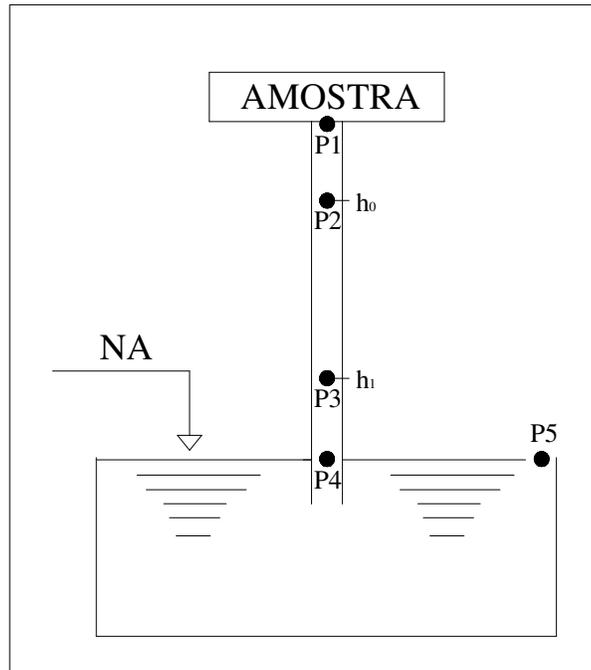


Figura 7.20 – Esquema ilustrativo da variação de pressão durante o ensaio de permeabilidade ao ar do concreto.

Considerando o equipamento de ensaio de permeabilidade ao ar e os pontos P_1 , e P_2 e P_3 , localizados no mesmo, conforme pode ser observado na Figura 7.20, temos a diferença de pressão entre o início do ensaio (P_2) e a pressão no final do ensaio (P_3), assim como a pressão (P_1) em um dado tempo (t).

A partir dos dados empregados no ensaio:

$$h_0 = 83,93 \text{ cm}$$

$$h_1 = 30,80 \text{ cm}$$

Para $T = T_{\text{amb}}$,

$$P_1 = \rho_1 RT$$

$$P_2 = \rho_2 RT$$

Portanto:

Para $T = T_{amb}$,

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad \text{Equação 7.4}$$

Segundo a Lei de Stevin (GILLES, 1963), $P_4 = P_5 = P_{atm}$

Em $h_0 = 83,93$ cm

$$P_4 - P_2 = \gamma_{H_2O} h$$

$$P_4 - P_2 = 8156,54 \text{ Pa}$$

$$P_2 = P_4 - 8156,54 \text{ Pa}$$

$$P_2 = P_4 - 8156,54 \text{ Pa}; P_{atm} \text{ em Campinas - SP} = 9320 \text{ Pa}$$

$$P_2 = 9320 \text{ Pa} - 8156,54 \text{ Pa}$$

$$P_2 = 1163,46 \text{ Pa}$$

Em $h_1 = 30,80$ cm

$$P_4 - P_3 = \gamma_{H_2O} h$$

$$P_4 - P_3 = 3018,40 \text{ Pa}$$

$$P_3 = P_4 - 3018,40 \text{ Pa}$$

$$P_3 = P_4 - 3018,40 \text{ Pa}; P_{atm} \text{ em Campinas - SP} = 9320 \text{ Pa}$$

$$P_3 = 9320 \text{ Pa} - 3018,40 \text{ Pa}$$

$$P_3 = 6301,60 \text{ Pa}$$

Considerando a pressão no lado externo da amostra (em contato com o meio externo) seja igual a pressão atmosférica, que é igual à 9320 Pa, e que a pressão no ponto P_2 ocasiona uma pressão negativa e contrária no ar do interior do tubo, imediatamente antes do fluido, temos que a pressão quando a água está em h_0 é a mesma que no ponto P_2 , mas com sinal contrário (-1163,40 Pa). Portanto, há uma diferença de pressão entre as faces da amostra de:

$$9320 \text{ Pa} - (-1163,46 \text{ Pa}) = 10483,46 \text{ Pa}.$$

No ponto P_3 , assim como no ponto P_2 , ocasiona uma pressão no interior do tubo de mesmo módulo, mas de sentido contrário, portanto, - 6301,60 Pa. Portanto:

$$9320 \text{ Pa} - (- 6301,60 \text{ Pa}) = 15621,6 \text{ Pa}.$$

Dessa forma, a diferença de pressão entre o início e o fim de ensaio é de:

$$\Delta P = 15621,6 \text{ Pa} - 10483,46 \text{ Pa} = 5138,14 \text{ Pa}.$$

A relação entre as pressões no ponto P_2 (h_0) e ponto P_3 (h_1), é:

$$\frac{P_2}{P_3} = \frac{\rho_2}{\rho_3} = \frac{1163,46 \text{ Pa}}{6301,60 \text{ Pa}} = 0,18$$

Dessa forma, é possível demonstrar que entre o início e o final do ensaio de permeabilidade a pressão varia, de aproximadamente, 5 kPa e que a relação entre a pressão no ponto 3 (P_3) e a pressão no ponto 2 (P_2) é de 0,18.

7.2.3 Número Reynolds do escoamento

O número Reynolds (R) é um parâmetro empregado para a caracterização do tipo de escoamento, conforme pode ser observado analiticamente na Equação 3.10 (pág. 38).

$$R = \frac{Vd\rho}{\mu} \quad \text{Equação 3.10}$$

Onde:

V = Velocidade média do escoamento (m/s);

d = diâmetro da amostra que é responsável pelo escoamento (m);

ρ = massa específica do fluido (Kg/m^3);

μ = viscosidade do fluido (Pa.s).

Assim, escoamento em meios porosos pode ser classificado em três tipos:

- Escoamento laminar;
- Escoamento de transição; e
- Escoamento turbulento.

Onde, para $R < 2100$ o escoamento caracteriza-se como laminar. Para $2100 < R < 4000$, o regime de escoamento é considerado como de transição. E para $R > 4000$, o regime de escoamento é turbulento (GILLES, 1973). Dessa forma, serão considerados nesse trabalho os valores obtidos pelos experimentos de Reynolds, para caracterizar o tipo de escoamento.

Nesse trabalho, o número Reynolds foi calculado de três formas distintas. Primeiramente, foi calculado a partir da Equação 3.10 onde o diâmetro (d) da amostra utilizado foi o diâmetro do corpo-de-prova, denominado como **Reynolds do escoamento**. O número Reynolds foi calculado também por meio da consideração de que o fluxo de ar ocorre através dos poros do concreto, cujo qual denominou-se de **Reynolds nos poros** e os valores da velocidade do fluxo de ar no interior do concreto foram calculados pela relação entre velocidade do escoamento e a porosidade do concreto (índice de vazios). Reynolds foi calculado também por meio da consideração do fluxo gerado por meio do tempo necessário para que o volume de ar passante através da amostra de concreto, cujo qual foi denominado **Reynolds-poros**.

- Reynolds escoamento:

O número Reynolds do escoamento foi calculado por meio da Equação 3.10 e os seus resultados são apresentados na Figura 2.1

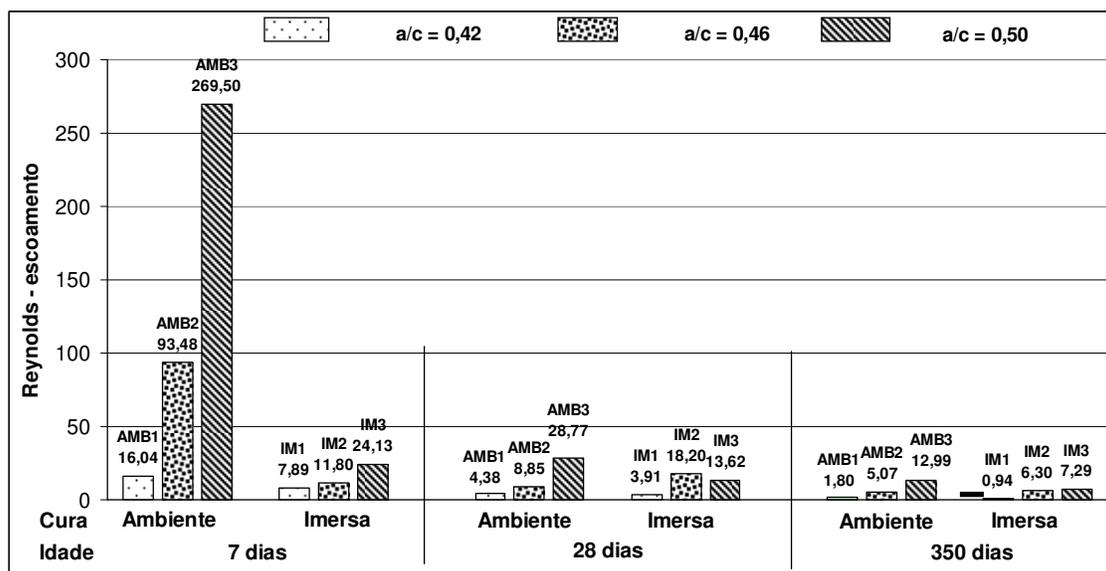


Figura 7.21 – Número Reynolds do escoamento.

Na Figura 7.21 é possível observar a diminuição do número Reynolds com o aumento da idade do concreto, quando o tipo de cura empregado foi a imersa e quando houve a diminuição da relação água/cimento. Os resultados obtidos puderam comprovar, para esse tipo de avaliação, que o escoamento de ar no ensaio de permeabilidade ao ar do concreto pode ser considerado como laminar, pois os resultados obtidos foram inferiores à 2100 (GILLES, 1973).

- Reynolds nos poros:

Para os resultados apresentados na Figura 7.22, são os valores do número Reynolds onde os valores da velocidade do escoamento nos poros do concreto foram calculados por meio da relação entre a velocidade do escoamento e a porosidade (Equação 3.12 - pág. 40) (VENNARD & STREET, 1975).

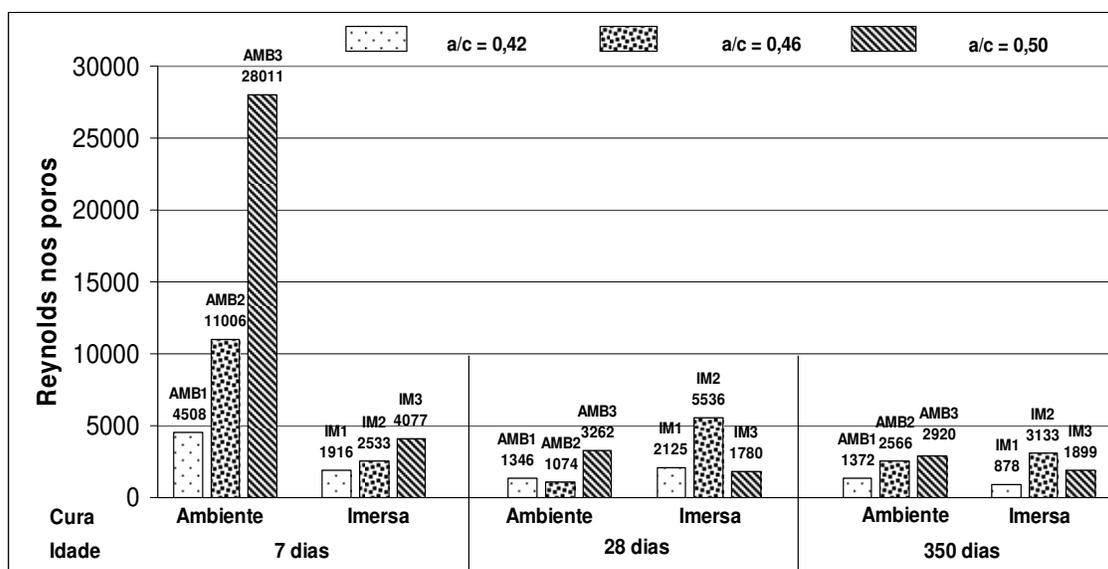


Figura 7.22 – Número Reynolds do escoamento - interior dos poros.

Os resultados apresentados na Figura 7.22 e calculados considerando a porosidade do concreto mostraram-se superiores aos observados na Figura 7.21. Esse comportamento pode ser explicado devido à mudança da dimensão a da área de seção transversal da amostra inserida na Equação 3.10 (pág. 38). Quando o diâmetro usado na Equação 3.10 é o diâmetro da amostra de concreto (0,1 m), considera-se que a área originada por esse diâmetro é a responsável pelo escoamento. No entanto, a área responsável pelo fluxo são os poros do concreto e quando a área de seção transversal de um escoamento diminui, a velocidade do escoamento aumenta e como a velocidade do escoamento é diretamente proporcional ao número Reynolds, o último, conseqüentemente, também aumenta. Dessa maneira, pode ser explicada a diferença entre os resultados apresentados na Figura 7.21 e Figura 7.22.

Os resultados do número Reynolds apresentados na Figura 7.22 mostraram que em apenas 40% das amostras avaliadas, o escoamento ocorreu sob forma laminar. Os resultados também mostraram que em 33% das amostras avaliadas o escoamento ocorreu em fase de transição e que em 27% das amostras avaliadas, o escoamento ocorreu de forma turbulenta, segundo os parâmetros de avaliação propostos por Gilles (1973).

- Reynolds-poros:

O número Reynolds foi calculado também em função da vazão do escoamento. Foi calculada a vazão, por meio do tempo necessário para que o ar preenchesse o volume do tubo capilar entre as alturas h_0 e a h_1 . A partir da medição do volume, a vazão do escoamento (Equação 7.5) foi calculada e, conseqüentemente, calculada a velocidade do escoamento (Figura 7.19). Então, os valores dessa velocidade foram inseridos na Equação 3.10 (pág. 38). Dessa forma, considerando os poros do concreto como micro tubos, os valores do número Reynolds obtidos (Figura 7.23) podem ser considerados como o escoamento de ar no interior dos poros capilares do concreto.

$$Q = \frac{V_{h_0 \rightarrow h_1}}{t_{h_0 \rightarrow h_1}} \quad \text{Equação 7.5}$$

Onde:

Q = Vazão do escoamento (m^3/s);

$V_{h_0 \rightarrow h_1}$ = Volume do tubo capilar entre as alturas h_0 e a h_1 (m^3).

$t_{h_0 \rightarrow h_1}$ = tempo do deslocamento do líquido capilar deslocar-se das alturas h_0 e a h_1 (s).

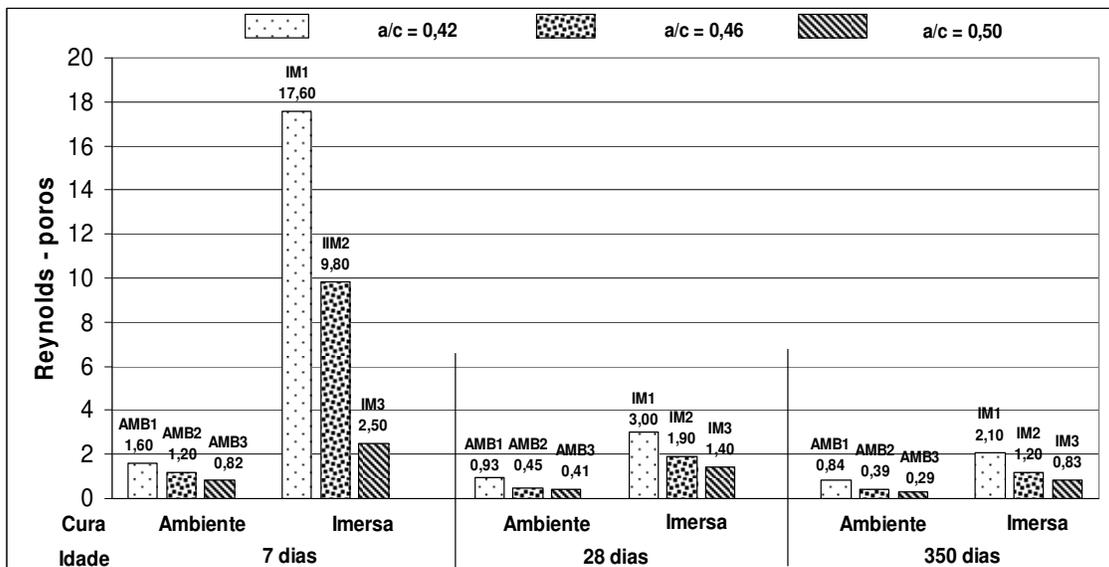


Figura 7.23 – Número Reynolds do escoamento - poros.

Por meio das considerações realizadas e Equação 7.5, foi possível obter os resultados apresentados na Figura 7.23. Os resultados mostraram, assim como os apresentados na Figura 7.22, que para todas as amostras avaliadas, o escoamento ocorreu sob regime laminar (GILLES, 1973).

8

Conclusões

Este trabalho experimental teve como objetivo avaliar a permeabilidade ao ar do concreto quando se modifica a relação água/cimento, a idade de hidratação e o tipo de cura. Avalio-se também o coeficiente de absorção de água por capilaridade. Pra isso foi analisado também o mecanismo de escoamento do ensaio de permeabilidade ao ar, de forma que a metodologia empregada (metodologia de Thenoz) pudesse ser avaliada.

Os resultados obtidos neste estudo experimental permitiram chegar às seguintes conclusões:

8.1 Índice de vazios

- A relação água/cimento influenciou nos resultados do índice de vazios da série de amostras estudadas, onde menores relações água/cimento obtiveram menores resultados de índice de vazios do concreto.

- A idade de hidratação também influenciou nos resultados de porosidade obtidos, onde os concretos testados com 350 dias tiveram menores resultados de índice de vazios do que os ensaiados aos 28 dias e 7 dias. Comprovando que maiores idades proporcionam menores valores de índice de vazios do concreto.

- Assim com as demais variações, o tipo de cura empregado também influenciou nos resultados de porosidade, sendo que os concretos submetidos à cura imersa obtiveram menores valores de índice de vazios do que os concretos submetidos à cura ambiente.

8.2 Coeficiente de absorção de água por capilaridade

- A influência da relação água/cimento no coeficiente de absorção de água por capilaridade foi similar à tendência obtida nos resultados de porosidade do concreto, isto é, as séries de concreto produzidas com menor relação água/cimento, ensaiadas com maiores idades e cujo tipo de cura empregada foi a imersa, obtiveram menores valores de absorção de água por capilaridade.

- A idade de hidratação e o tipo de cura (imersa e ao ar) influenciaram nos resultados do coeficiente de absorção de água por capilaridade. Os concretos ensaiados aos 7 dias tiveram maiores valores de absorção do que os testados aos 28 dias e aos 350 dias.

8.3 Mecanismo de escoamento

A avaliação do mecanismo do escoamento foi realizada por meio de estudos da velocidade, do número Reynolds e do número Mach. Os resultados obtidos mostraram que estudos mais aprofundados devem ser realizados para que dados mais precisos possam ser obtidos, devido às divergências encontradas e ao grande número de considerações realizadas.

8.4 Velocidade de escoamento do ar

Os resultados obtidos mostraram que o tipo de cura, relação água/cimento e idade de hidratação influenciaram na velocidade de escoamento de ar nos poros do concreto. Concretos submetidos à cura imersa obtiveram menores valores de velocidade do escoamento do que os submetidos à cura ambiente. Concretos com menores relações água/cimento mostraram menores velocidades de escoamento. O tipo de cura, a idade e a relação água/cimento influenciaram os mecanismos de ingresso e transporte de massa no interior do concreto.

8.5 Número Mach

Considerando o número Mach como um parâmetro de avaliação da compressibilidade do fluido em mensurações da permeabilidade de meios porosos, os resultados obtidos comprovaram que o fenômeno de compressibilidade ao ar pode ser ignorado quando a metodologia de Thenoz e equacionamento empregado na mesma metodologia são utilizados.

8.6 Número Reynolds

Considerando os poros de concreto como microtubos e utilizando o número Reynolds como forma de caracterização do tipo de escoamento (laminar ou turbulento), o presente estudo permitiu concluir que com a utilização da metodologia Thenoz para a mensuração da permeabilidade ao ar do concreto, o mecanismo de escoamento ocorre sob regime laminar.

8.7 Permeabilidade ao ar

Com base nos estudos realizados e hipóteses adotadas na avaliação do mecanismo de escoamento do ar no concreto, a metodologia empregada para avaliar a permeabilidade ao ar do concreto pode ser considerada como válida, pois os resultados da análise fluido-dinâmica durante o ensaio de permeabilidade ao ar do concreto, de acordo com o método proposto por Thenoz, mostraram que as considerações físicas no mecanismo de escoamento podem ser corretamente adotadas, gerando assim, resultados confiáveis. No entanto, é recomendado que mais estudos sejam realizados para que possam ser avaliadas as divergências de resultados obtidos em diferentes trabalhos que empregaram o método para medir a permeabilidade ao ar do concreto. Logo, os resultados obtidos permitem fazer as seguintes considerações:

- Os resultados de permeabilidade apresentaram valores que comprovaram a influência da relação água/cimento nesta propriedade. Relações água/cimento baixas produziram concretos com baixa permeabilidade ao ar.

- Os concretos com idade de hidratação de 7 dias apresentaram maiores valores de permeabilidade ao ar do que aqueles ensaiados aos 28 dias e 350 dias.

- O tipo de cura também influenciou na permeabilidade ao ar do concreto, em que os submetidos à cura imersa apresentaram menores valores de permeabilidade ao ar do que aqueles submetidos à cura ambiente.

8.8 Sugestões para prosseguimento da pesquisa

Devido o método de Thenoz ser uma metodologia nova para avaliar a permeabilidade ao ar do concreto, recomenda-se que mais avaliações, empregando o mesmo método sejam realizadas, visando comprovar a sua viabilidade técnica e econômica.

Sugere-se também como prosseguimento da pesquisa a avaliação da metodologia de Thenoz com a utilização de outros meios porosos, como argamassas, gesso e concretos com diferentes traços dos empregados no presente trabalho.

Para avaliação do número Reynolds do escoamento, sugere-se que análises mais aprofundadas sejam realizadas, como utilização de diferentes meios porosos e avaliação de um maior número de amostras, para isso, recomenda-se que trabalhos focados exclusivamente no tema sejam realizados, ou seja, trabalhos com o objetivo somente de avaliar o mecanismo de escoamento durante o ensaio.

Referências

ABDIAS, M. G.; AGUIAR, J. E.; ALBERTINI NETO, H.; COSTA, J. E. Permeabilidade do concreto: Um estudo para avaliação “in situ” usando instrumentos portáteis e técnicas tradicionais. III Pan-American Conference for Nondestructive Testing. **Anais**. Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM76**: Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine), Rio de Janeiro: ABNT, 1976.

____. **NBR 11578 (EB 2138)**: Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro 1991.

____. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

____. **NBR 5735 (EB 208)**. Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1990.

____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003d.

____. **NBR 6466**: Determinação do peso unitário de agregados para concreto em estado solto. Rio de Janeiro: ABT, 1982.

____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

____. **NBRNM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

____. **NBRNM 43:** Cimento Portland – Determinação da água da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

____. **NBRNM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2003d.

____. **NBRNM 52:** Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b.

____. **NBRNM 53:** Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2003c.

____. **NBRNM 65:** Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ABNT: 2003.

____. **NBRNM 76:** Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

____. **NBRNM:** 248 Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a.

____. **NBRNM76:** Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine), Rio de Janeiro: ABNT, 1976.

BÁGEL, L.; ZIVICA, V. Relationship between pore structure and permeability of hardened cement mortars: on the choice of effective pore structure parameter. **Cement and Concrete Research**. vol. 27, pp. 1225-1235, 1997.

BANTHIA, N.; MINDESS, S. Water permeability of cement paste. **Cement and Concrete Research**. vol. 19, pp. 727-736, 1989.

BARDELLA, P. S. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com os cimentos Portland de alta resistência inicial e de alto-forno com sílica ativa curados termicamente.** Campinas. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2005

BARROS, P. G. S. **Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito.** Maceió. Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, 2008

BASHEER, L.; BASHEER, P. A. M.; LONG, A. E. Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**. Vol. 19, pp. 682-690, 2005.

BODIN, F. B.; ZAHARIEVA, H. Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. **Materials and Structures**. vol. 35, pp. 504-509, 2002.

BROWN, P. W.; SHI, D. Porosity/Permeability relationships. In: SKANLNY, J.; MINDESS, S. **Materials Science of Concrete II**. The American Ceramic Society. United States of America, 1991.

BUTLER, A. Capillary absorption by concrete. **Concrete**. vol. 31, nº. 7, 1997.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Ed. LTC. 5º Ed. Rio de Janeiro, 2002.

CAMARINI, G. **Desempenho de Misturas de Cimento Portland e Escória de Alto-Forno Submetidas a Cura Térmica.** São Paulo. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo , 1955

CAMARINI, G.; BARDELLA, P. S.; PEREIRA, V. M. Evaluation of Thenoz Methodology to Measure Concrete air Permeability, **ACI – SP 253-14**. vol. 252, 2008.

CAMARINI, G. Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água. In: 41º Congresso Brasileiro do Concreto, **Anais**, Salvador, IBRACON, 1999.

CAMARINI, G. Curing effects on air permeability of concrete. **Advanced Materials Research**. vol. 214, 2011.

CATHER, R.; FIGG, W.; MARSDEN, A. F.; O'BRIEN, T. P. Improvements to the Figg method for determining the air permeability of concrete. **Magazine of Concrete Research**. vol. 36, n^a 129, 1984.

CHIDIAC, S. E.; MAADANI, O.; RAZAQPUR, A. G.; MAILVAGANAM, N. P. Correlation of rheological properties to durability and strength of hardened concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. vol. 15, 2003.

CHUNG, D. D. L. Review improving cement-based materials by using silica fume. **Journal of Materials Science**. n.º 37, 2002, pp. 673-682.

COUTO, P.; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; LOPES, A. N. M. Influência das condições de cura na absorção e permeabilidade de diferentes concretos. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. **Anais**. São Paulo, Brasil, 2003.

DIAMOND, S. Aspects of concrete porosity revisited. **Cement and Concrete Research**. vol. 29, pp. 1181-1188, 1999.

DULLIEN, F. A. L. Porous Media – **Fluid and Pore Structure**. 2º Ed. Ed. Academic Press, Inc. London, 1979.

DWIVEDI, V. N.; DAS, S. S.; SING, N. B.; RAI, S.; GAJBHIYE. Portland cement hydration in the presence of admixtures – black gram pulse and superplasticizer. **Materials Research**. vol. 11, n. 4, 427-432, 2008.

EL DIEB, A. S.; HOOTON, R. D. Evaluation of the Katz-Thompson model for estimating the water permeability of cement-based materials from mercury intrusion porosimetry data. **Cement and Concrete Research**. vol. 24, n.º 3, pp. 443-455. 1994.

ESCALANTE, J. I.; GÓMEZ, L. Y.; JOHAL, K. K.; MENDONZA, G.; MANCHA, H.; MÉNDEZ, J. Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions. **Cement and Concrete Research**. vol, 31, pp 1403-1409, 2001.

FELDMAN, R. F. The porosity and pore structure of hydrated Portland cement paste. Pore structure and permeability of cement materials. **Materials Research Society Symposium**. Proceedings. vol. 137. Boston, 1988.

FERREIRA Jr. E. L. **Avaliação de propriedades de concretos de cimento Portland de alto forno e cimento Portland de alta resistência inicial submetidos a diferentes condições de cura**. Campinas. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2003

FIROOZABADI, A.; KATZ, D. L. An analysis of high-velocity gas flow through porous media. **Journal of Petroleum Technology**. pp. 211-216. 1979

FRANCISS, F. O. **Hidráulica de meios permeáveis: escoamento em meios porosos**. Ed. Da Universidade de São Paulo, Rio de Janeiro – RJ, 1980.

FU, X.; HOU, W.; YANG, C.; LI, D.; WU, X. Studies on Portland cement with large amount of slag. **Cement and Concrete Research**. vol. 30, pp. 645-649, 2000.

GARBOCZI, E. J. Permeability, diffusivity, and microstructural parameters: a critical review. **Cement and Concrete Research**. vol. 20, pp. 591-601, 1990.

GILLES, R. V. **Mecânica dos fluidos e hidráulica**. Ed. Ao livro Técnico, Rio de Janeiro, 1967.

GLASSER, F. P. Chemical, Mineralogical, and Microstructural Changes Occurring Hydrated Slag-Cement Blends. In: SKALNY, J.; MINDESS S. **Materials Science of Concrete II**. United States of America, 1991.

GOODMAN, R. E. **Introduction to Rock Mechanics**. 2nd ed. Ed. John Wiley & Sons, New York, 1976.

INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C. Considerações sobre a estimativa da permeabilidade em concretos refratários através das equações de Darcy e de Forchheimer. **Cerâmica**. vol. 45, nº 292-293, 1999a.

INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C. Desenvolvimento de aparato experimental para avaliação da permeabilidade de concretos refratários em temperaturas de até 800 °C. 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica. **Anais**. São Pedro-SP. 2000.

INNOCENTINI, M. D. M.; PARDO, A. R. F. PANDOLFELLI, V. C. Influência da compressibilidade do ar na obtenção de parâmetros de permeabilidade de concretos refratários. 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica. **Anais**. Florianópolis – SC, 1999b.

INNOCENTINI, M. D. M.; PARDO, A. R. F.; PANDOLFELLI, V. C. Permeability of high-alumina refractory castables based on various hydraulic binders. **J. Am. Ceram. Soc.** vol. 85, pp. 1517-1521, 2002.

KATZ, D. L.; CORNELL, D. OETTMAN, F. H.; VARY, J. A.; ELENBASS, J. R.; WEINAUG, C. F. **Handbook of natural gas engineering**. McGraw-Hill Book Company Inc., New York City, 1959.

KENNETH, D. P.; SNYDER, A; GARBOCZI, E. J. Percolation and pore structure in mortars and concrete. **Cement and Concrete Research**. vol. 24, pp. 25-37, 1994.

KJELLEN, K. O.; WALLEVIR, O. H.; F. JÄLLBERG, L. Microstructure and microchemistry of paste-aggregate interfacial transition zone of high-performance concrete. **Advance in Cement Research**. vol. 10, n. 1, pp. 33-40, 1998.

LIAO, K. Y.; CHANG, P. K.; PENG, Y. N.; YANG, C. C. A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete. **Cement and Concrete Research**. vol. 34, issue 6, 2004.

LISBOA, E. F. A. **Uma abordagem multi-escala para o cálculo da permeabilidade longitudinal de meios porosos fibrosos randômicos**. Rio de Janeiro. Dissertação

(Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000

McGRATH, P. F. Water permeability vs waterproof. ASCE Met Section Construction Group. **Anais**. Canadá, 2000, p. 1-6.

MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J.; BORBA JÚNIOR, J. C. Carbonatação natural de concreto: Resultados de cerca de quatro anos de monitoramento. XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC, **Anais**, Florianópolis, 2006.

METHA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª ed. Ed. Pini. São Paulo, 2008.

MINDESS, S. Interfaces in concrete. **Materials Science of Concrete**. The American Ceramic Society, 1989.

MOREIRA, E. A; INNOCENTINI, M. D. M.; SALVINI, V. R.; PANDOLFELLI, V. C.; COURY, J. R. Permeabilidade de cerâmicas celulares. **Revista da Universidade Rural – Série Ciências Exatas de da Terra**, UFRRJ, vol. 21, pp. 177-185, 2002.

MOREIRA, H. P.; FIGUEIREDO, E. P.; HELENE, P. Avaliação da influência de alguns agentes agressivos na resistência à compressão de concretos amassados com diferentes tipos de cimentos brasileiros. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PCC/286**. São Paulo, 2001.

NAIK, T.; SINGH, S. S. Permeability of concrete containing large amounts of fly ash. **Cement and Concrete Research**, vol. 24, n.º 5, pp. 913-922, 1994.

NEPOMUCENO, A. A. Mecanismo de transporte no concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 2ª ed. IBRACON, 2005.

NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**. Ed. Pini. São Paulo, 1982.

NUNES, F. L.; HELENE, P. R. L. Influência da dosagem na carbonatação dos concretos. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PCC/230.** São Paulo, 1998.

ODLER, I.; RÖBLER, M. Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated cement pastes. II. Effect of pore structure and degree of hydration. **Cement and Concrete Research**, vol 15, pp. 401-410, 1985.

OLLIVIER, J. P.; MASSAT, M. Permeability and microstructure of concrete: a review of modelling. **Cement and Concrete Research**, vol. 22, pp. 503-514, 1992.

PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. Effect of composition environmental factors in cement-lime mortar coating on concrete carbonatation. **Materials and Structures**, n.º 25, 1992, p. 293-304

PARDO, A. R. F.; INNOCENTINI, B. M. D. M.; MENEGAZZO, B.; PANDOLFELLI, V. C. Permeabilidade de concretos avançados. 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica. **Anais.** São Pedro-SP, 2000.

PAULINI, P. A laboratory and on-site test method for air permeability of concrete, Proceedings of the 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure, 4-6 October 2010, Delft, **RILEM PRO 70**, vol. II, 995-1002

PAULINI, P.; NASUTION, F. Air permeability of near surface concrete. Concrete under severe conditions: Environment & Loading, **CONSEC' 07 Tours**, France, 2007.

PEREIRA, L. F. L. C.; CINCOTTO, M. A. Determinação de cloretos em concreto de cimentos Portland: influência do tipo de cimento. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PCC/294.** São Paulo, 2001.

PEREIRA, V. M.; CAMARINI, G. Air permeability of concrete by Thenoz method. **Advanced Materials Research**. vol, 224, 2011.

PEREIRA, V. M.; CAMARINI, G.; CARVALHO, E.; BARDELLA, P. S. Análise fluido-dinâmica do escoamento em ensaio de permeabilidade ao ar de argamassas preparadas com

cimento Portland de alto-forno. **Cerâmica**, Jun. 2008, vol.54, no.330, p.160-166. ISSN 0366-6913.

PEREIRA, V. M.; CARVALHO, E.; CAMARINI, G. Mecanismo de escoamento em ensaio de permeabilidade ao ar de argamassas. XIV Jornadas de Jovens Pesquisadores AUGM. **ANAIS**. Campinas, 2006.

PERRATON, D. GIBERGUES, A.; AITCIN, P. C.; THENOZ, B. Air Permeability measurement. **Materials Research Society**, vol. 137, pp. 191-201, 1989.

PIHLAJAJAVAARA, S. E.; PAROLL, H. On the correlation between permeability properties and strength of concrete. **Cement and Concrete Research**. vol. 5, pp. 321-328, 1975.

PON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. **Construction and Building Materials**. n.º 20, 2006, pp. 858-865.

RAMESH, G.; SOTELINO, E. D.; CHEN, W. F. Effect of transition zone on elastic stress in concrete materials. **Journal Materials in Civil Engineering**. vol. 10. issue 4, 1998.

RAO, G. A., Investigations on the Performance of Silica Fume-Incorporated Cement Pastes and Mortars. **Cement and Concrete Research**, vol. 33, pp. 1765-1770, 2003.

REGATTIERI, C; E. X.; HELENE, P. R. L. Mecanismos de transporte de agentes agressivos no concreto. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PCC/232**. São Paulo, 1999.

ROY, D. M. Relationships between permeability, porosity, diffusion and microstructure of cement pastes, mortar and concrete at different temperatures. **Materials Research Society**, vol. 37, 1989.

RUMER Jr. R. R. Resistance to flow through porous media. In: De WIEST, R. J. M. **Flow Through Porous Media**. Ed. Academic Press, New York and London, 1969.

SALOMÃO, R.; CARDOSO, F. A.; INNOCENTINI, M. D. M.; BITTENCURT, L. R. M.; PANDOLFELLI, V. C. Efeito de fibras poliméricas na permeabilidade de concretos refratários. **Cerâmica**, vol. 49, pp. 23-28, 1999.

SCRIVINER, K. L. The microstructure of concrete. In: SKALNY, J.; MINDESS, S. **Materials Science of Concrete I**. United States of America, 1989.

SHEID, C. M.; MASSARANI, G. Escoamento acelerado de fluido não-newtoniano através de meio poroso. **Revista da Universidade Rural, Série Ciências Exatas**, vol. 21, n.º1, pp. 225-229, 2002.

SHUTTER, G. D., Hydration and temperature development of concrete made with blast-furnace slag cement. **Cement and Concrete Research**, vol. 29, pp. 143-149, 1999.

SILVA, I. J.; LIBÓRIO, J. B. L.; DE MELO, A. B. Medida da estrutura porosa de pasta e concreto de cimento Portland. . In: 41ª REIBRAC - Reunião do Instituto Brasileiro do Concreto, 1999, Salvador. **Anais do 41ª REIBRAC - IBRACON**, 1999.

SILVA, P. F. A. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana**. Ed. Pini LTDA, São Paulo, 1995.

SILVA, V. M.; LIBÓRIO, J. B. L. A carbonatação em vigas de concreto armado sob tensão. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, vol. 8, n. 32, p. 105-108, 2006.

SMITH, G. J. F.; du PLESSIS, J. P. Modeling of non-Newtonian purely viscous flow through isotropic high porosity synthetic foams. **Chemical Engineering Science**, vol. 54, pp. 645-654, 1999.

SOUZA, R. B.; JOHN, V. M. Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos: método de ensaio acelerado. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PCC/454**. São Paulo, 2007.

SPRINGER, D. S.; LOACIGA, H. A.; CULLEN, S. J; EVERETT, L. G. Air permeability of porous materials controlled laboratory conditions. **Ground Water**, vol. 36, n.º 4, pp. 558-565, 1998.

STREETER, V. L. **Mecânica dos fluidos**. MacGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1977.

SUGIYAMA, T.; BREMNER, T. W.; TSUJI, Y. Determination of chloride diffusion coefficient and gas permeability of concrete and their relationship. **Cement and Concrete Research**, vol. 26, n.º 5, pp. 781-790, 1996.

TELLES, A. S.; MASSARANI, G. Escoamento de fluidos através de meios porosos anisotrópicos. COPPE/UFRJ – **Publicação Técnica**, 1972.

THENOZ, B., Measure de la perméabilité et de la porosité des roches très compactes. **G.R.A.S.**, 243, 1969, pp. 289-291.

TSIVILIS, S.; KAKALI, G. CHANIOTAKIS, E. SAKELLARIOU, A. The Permeability of Portland limestone cement concrete. **Cement and Concrete Research**, vol. 33, pp. 1465-1471, 2003.

TUMIDAJSKI, P. J.; LIN, B. On the validity of the Katz-Thompson equation for permeabilities in concrete. **Cement and Concrete Research**, vol. 28, pp. 643-647, 1998.

TUUTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Sweden: CBI, 1982. 468p.

VENNARD, J. K.; STRETT, R. L. **Elementos de mecânica dos fluidos**. Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1978.

VERDIER, J.; CARCASSÈS, M.; OLLIVIER, J. P. Modelling of a gas flow measurement application to nuclear containment vessels. **Cement and Concrete Research**, 32 (2002), pp. 1331-1340.

VIEIRA, S. L. **Determinação do coeficiente de inércia no escoamento não-darciniano através de meios porosos com saturação residual.** Campinas. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1990

WATSON, A. J.; OYEKA, C. Oil permeability of hardened cement paste and concrete. **Magazine of Concrete Research.** vol. 33, No. 115. June 1981. pp. 85-95.

WHITING, D. Permeability of Concrete, Permeability of selected concretes, SP-108, **American Concrete Institute**, Farmington Hills, Michigan, 1988.

WIEST, R. M. J. Fundamental principles of ground-water flow. In. de WIEST, R. J. M. **Flow through porous media.** Ed. Academic Press, New York and London, 1969.

WINSLOW, D.; LIU, DING. The pore structure of paste in concrete. **Cement and Concrete Research**, vol. 20, pp. 227-235, 1989.

ZADRAZIL, T. VODÁK, KAPOCHOVÁ, O. Effect of temperature and age of concrete on strength – Porosity relation. **Acta Polytechnica**, vol. 44. no. 1/2004.

ZORZETTO, L. M. M. **Estudo experimental do escoamento de fluidos não-newtonianos em meios porosos não consolidados.** Campinas. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1991

Apêndice A

Porcentagens retidas acumuladas do agregado miúdo

Peneiras (mm)	Retidas (g)	% Retidas	% Retidas Acumuladas
4,76	0,60	0,12	0,12
2,38	18,10	3,62	3,74
1,19	63,40	12,68	16,42
0,59	166,70	33,34	49,76
0,279	179,90	35,98	85,74
0,15	57,30	11,46	97,20
Fundo	14,00	2,80	100,00
Totais	500,00	100,00	253,98

MF = 2,53
DMC = 2,4 mm

APÊNDICE B

Granulometria do Agregado Graúdo

Peneiras (mm)	Material Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada
25,00	0	0	0
19,00	6,60	0,14	0,14
12,50	2918,50	58,32	58,51
9,50	1208,60	24,17	82,68
6,30	757,20	14,14	97,82
4,80	68,83	1,38	99,20
2,40	0,00	0,00	99,20
1,20	0,00	0,00	99,20
0,60	0,00	0,00	99,20
0,30	0,00	0,00	99,20
0,15	0,00	0,00	99,20
Fundo	40,27	0,80	100,00
Totais	5000,00	100	338,35

MF = 8,34
DMC = 19 mm

APÊNDICE C

Estudo de Dosagem

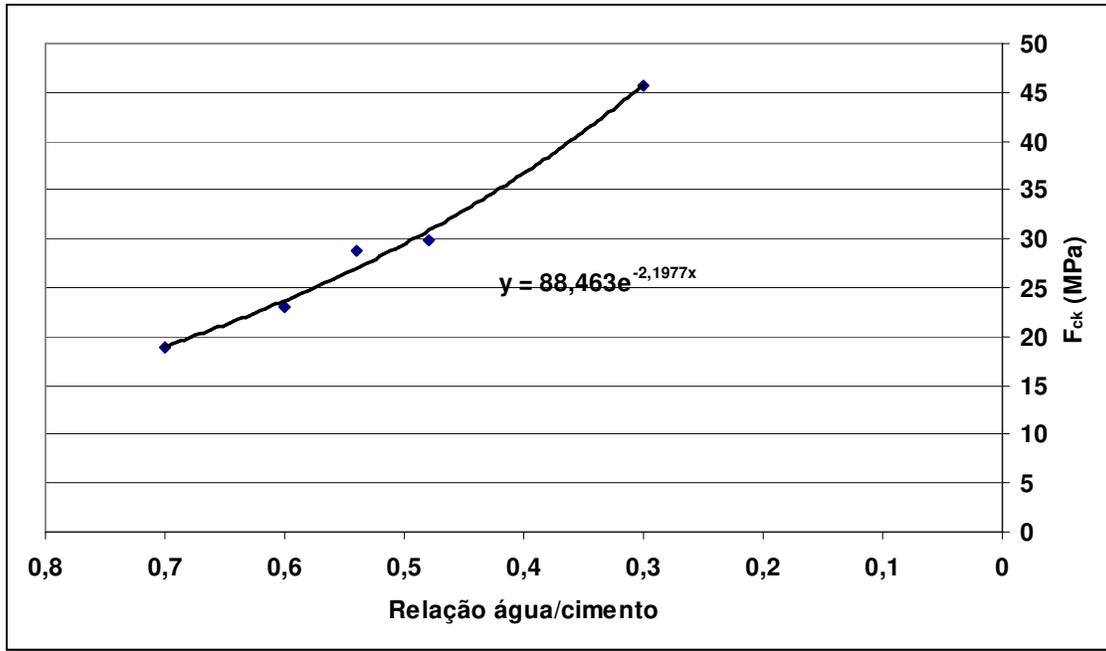


Gráfico do desenvolvimento da resistência à compressão em função da relação água/cimento

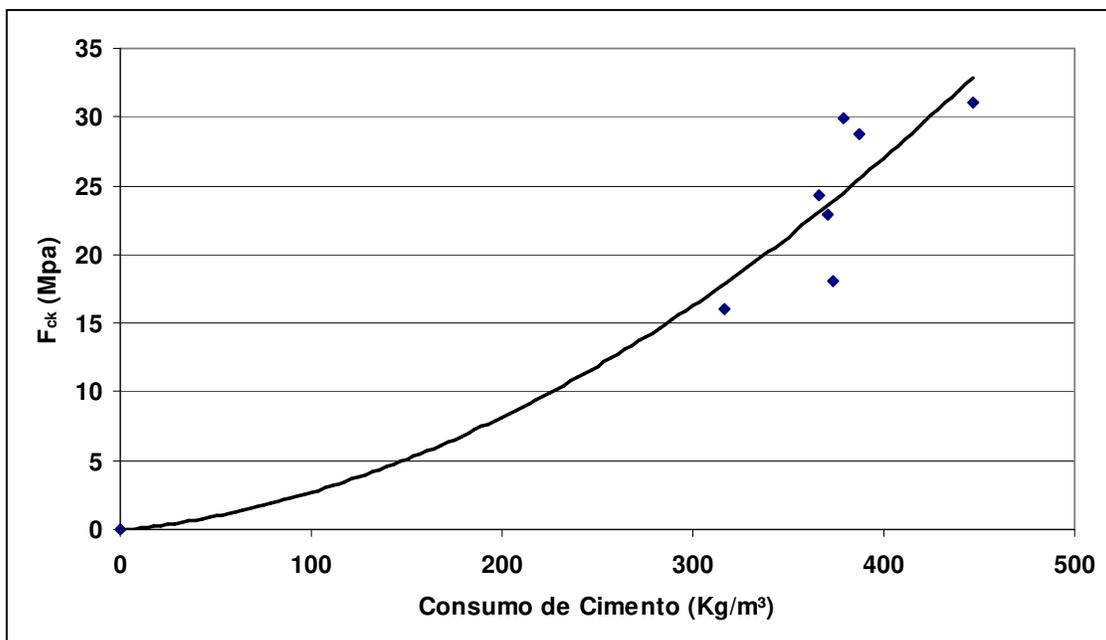
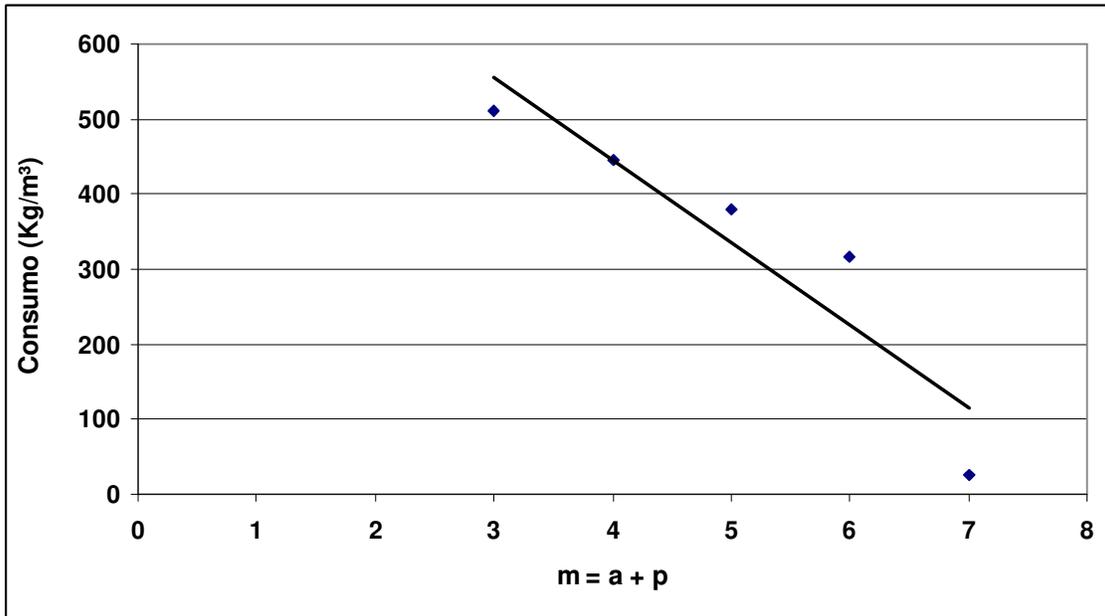


Gráfico da resistência à compressão em função do consumo de cimento



Consumo de cemento *versus* teor de agregados

APÊNDICE D

Consumo de Cimento

- Cálculo do consumo de cimento para a relação água/cimento = 0,42

Traço utilizado (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: água) = 1:2:3:0,42

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{b}{\gamma_b} + x}$$

onde:

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto (Kg/m^3);

γ_c = massa específica do cimento (g/cm^3);

γ_a = massa específica do agregado miúdo (g/cm^3);

γ_b = massa específica do agregado graúdo (g/cm^3); e

x = relação água/cimento.

Portanto para o traço 1:2:3:0,42 e propriedades dos materiais utilizados, tem-se:

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{2,99} + \frac{2}{2,60} + \frac{3}{2,99} + 0,42} = 396,83 \frac{Kg}{m^3}$$

Para a relação água/cimento igual a 0,42 foram utilizadas as seguintes quantidades de materiais:

Cimento = 52 Kg;

Agregado miúdo = 104 Kg;

Agregado graúdo = 156 Kg;

Água = 21,840 Kg; e

Aditivo superplastificante = 0,655 Kg.

- Cálculo do consumo de cimento para a relação água/cimento igual a 0,46

Traço utilizado (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: água) = 1:2:3:0,46

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{b}{\gamma_b} + x}$$

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{2,99} + \frac{2}{2,60} + \frac{3}{2,99} + 0,46} = 390,62 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Para a relação água/cimento igual a 0,46 foram utilizadas as seguintes quantidades de materiais:

Cimento = 50 Kg;

Agregado miúdo = 100 kg;

Agregado graúdo = 150 Kg; e

Água = 23 Kg.

- Cálculo do consumo de cimento para a relação água/cimento igual a 0,50

Traço utilizado (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: água) = 1:2:3:0,50

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{b}{\gamma_b} + x}$$

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{2,99} + \frac{2}{2,60} + \frac{3}{2,99} + 0,50} = 384,61 \frac{Kg}{m^3}$$

Para a relação água/cimento igual a 0,46 foram utilizadas as seguintes quantidades de materiais:

Cimento = 50 Kg;

Agregado miúdo = 100 kg;

Agregado graúdo = 150 Kg; e

Água = 25 Kg.

APÊNDICE E

Gráficos dos valores de absorção de água por capilaridade sem as curvas de tendência

(Idade: 7 dias)

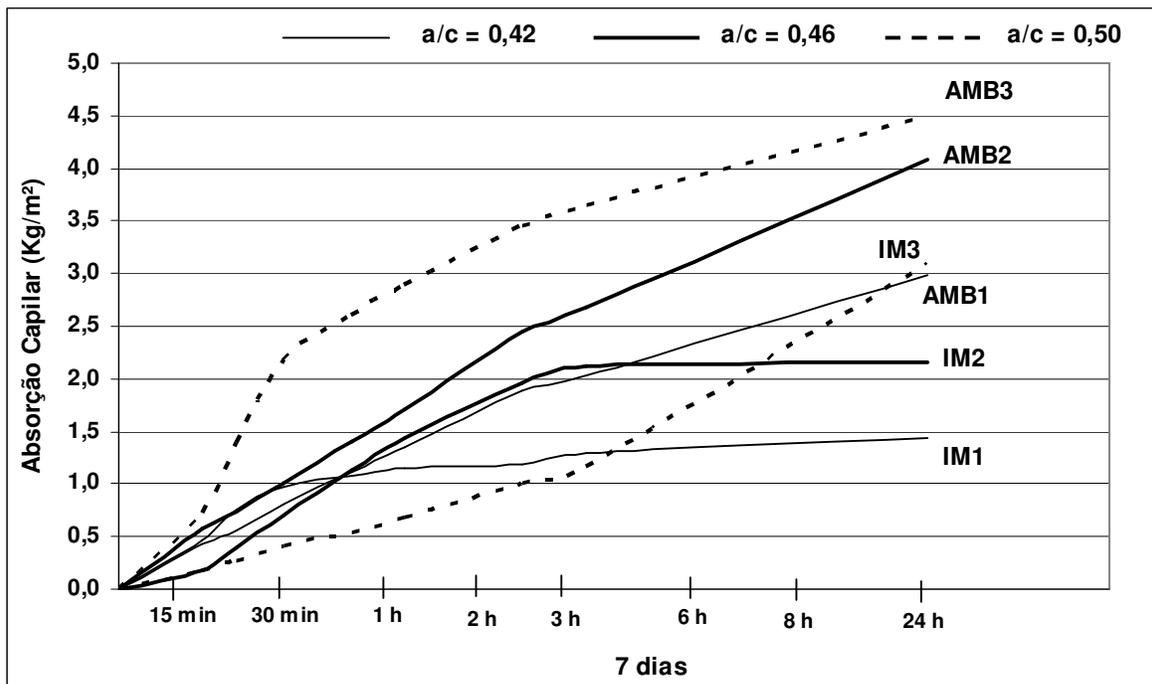


Gráfico dos valores de absorção de água por capilaridade: 7 dias.

(Idade: 28 dias)

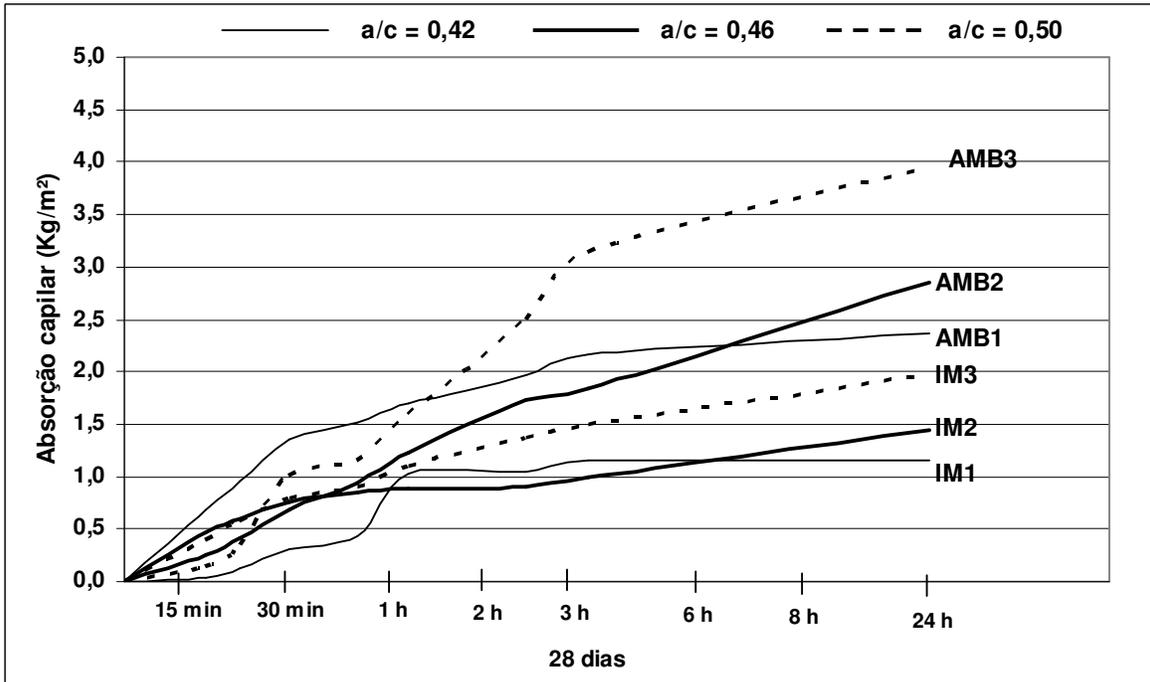


Gráfico dos valores de absorção de água por capilaridade: 28 dias.

(Idade: 350 dias)

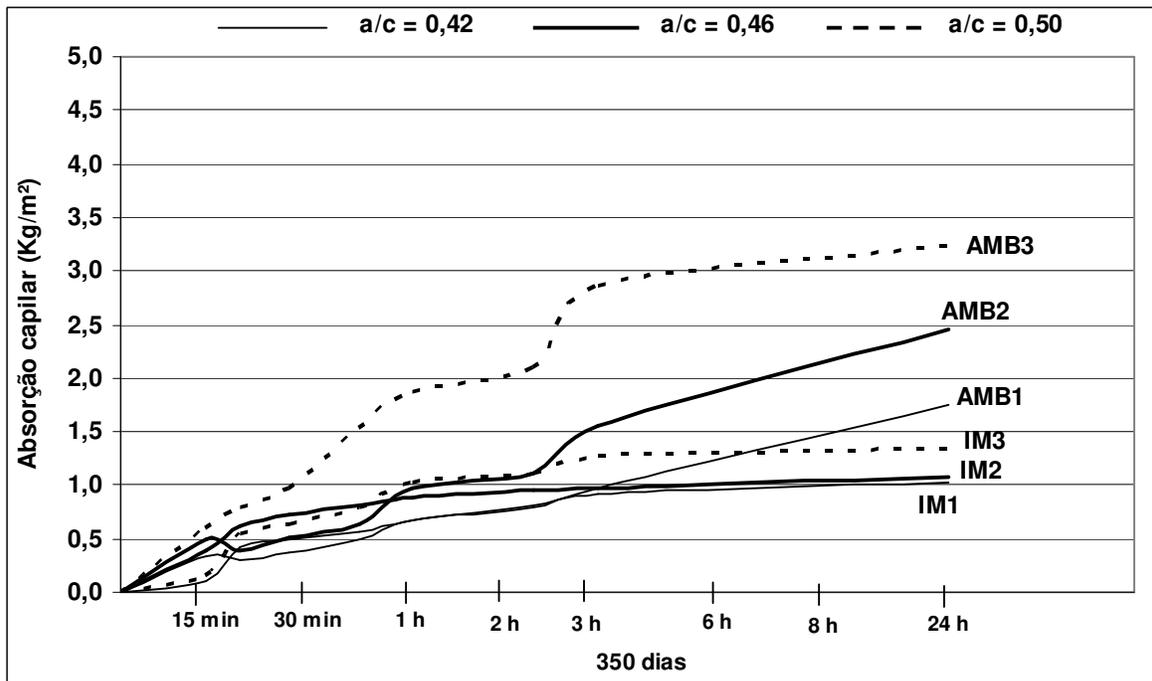


Gráfico dos valores de absorção de água por capilaridade: 350 dias.