

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA E  
CONSTRUÇÃO CIVIL**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE  
TRANSPORTE DE MASSA EM CONCRETOS  
CONTENDO ADIÇÕES MINERAIS**

**MARCUS VINÍCIUS ARAÚJO DA SILVA MENDES**

**D0007C09  
GOIÂNIA  
2009**

**MARCUS VINÍCIUS ARAÚJO DA SILVA MENDES**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE  
TRANSPORTE DE MASSA EM CONCRETOS  
CONTENDO ADIÇÕES MINERAIS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de mestre.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Oswaldo Cascudo, Dr.  
Co-orientadora: Helena Carasek, Dra.

**D0007C09  
GOIÂNIA  
2009**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
GPT/BC/UFG**

M538a Mendes, Marcus Vinícius Araújo da Silva.  
Avaliação das propriedades de transporte de massa contendo adições minerais [manuscrito] / Marcus Vinícius Araújo da Silva Mendes. - 2009.  
175 f. : figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo; Co-Orientadora: Dr<sup>a</sup> Helena Carasek.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2009.

Bibliografia.

Inclui lista de figuras, tabelas, abreviaturas e siglas, nomenclatura da química do cimento.

Anexos.

1. Concreto - Durabilidade 2. Concreto - Adições minerais 3. Concreto - Transporte de massa. I. Título.

CDU:624.012.45

Autorizamos a reprodução total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa.

Goiânia, -----/-----/-----

Assinatura:

e-mail: mvas.eng@gmail.com



Universidade Federal de Goiás  
Escola de Engenharia Civil  
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**"Avaliação das propriedades de transporte de massa em concretos contendo adições minerais"**

**Marcus Vinicius Araújo da Silva Mendes**

Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelos senhores:

  
Dr. Osvaldo Cascudo (UFG) - Orientador

  
Dr. Helena Cavasari Cascudo (UFG) - Co-orientadora

  
Dr. Daniel de Lima Araújo (UFG)

  
Dr. Maristela Gomes da Silva (UFES)

Goânia, 06 Outubro 2009

*À minha mãe,  
por ser uma guerreira e me apoiar sempre nos meus objetivos*

## AGRADECIMENTOS

A DEUS, que sempre guia meus passos me protegendo, iluminando e concedendo oportunidades.

Às mulheres da minha vida, minha mãe, minhas tias Nadi e Eneida, as quais foram as responsáveis pela minha formação como pessoa e nos estudos.

Aos meus orientadores Oswaldo Cascudo e Helena Carasek, pelo apoio, incentivo, sugestões e contribuições ao longo desta pesquisa. E também pela amizade e atenção dispensados a mim, o meu muitíssimo obrigado.

À Universidade Federal de Goiás, por ter me concedido uma oportunidade de estudar numa universidade pública, gratuita e de qualidade.

Ao Departamento e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A., os seus diretores Rubens Bittencourt e Moacir A. Souza de Andrade.

À ANEEL, por meio de Furnas, pelo indispensável apoio financeiro na pesquisa e pelo suporte financeiro na forma de bolsa de pesquisa.

Aos engenheiros, Alexandre de Castro e Ricardo Barbosa; pela confiança depositada a mim, desde época de estagiário.

À Maria Jesus Gomides (Ziza) pela sua eficiência na entrega dos relatórios e seu humor contagiante.

À Nicole pela sua atenção e pontualidade admirável.

Aos técnicos do DCT.C, em especial aqueles que tornaram possível a realização da pesquisa, dentre eles: Edson “mão de onça”, Keldson, Luciano e Aloísio.

Ao meu tio “irmão”, Valdir, pelos exemplos de humildade e tranquilidade.

Ao Carlos Roberto (Carlinhos), que me ajudou com suas idéias de inventor, as quais foram úteis para montagem dos aparatos de ensaio desta pesquisa.

Ao amigo de infância, sempre presente em minha vida, Marcell Alexandre.

Ao amigo, Marcelo Batista, o qual foi um grande companheiro de estágio, em Furnas, e foi com certeza um grande companheiro, também, no mestrado.

Aos amigos e colegas que tive oportunidade de conhecer durante os 7 anos de vida acadêmica, em especial: Carlos Eduardo, Matilde, Leonardo (banana), Cecília, Rüter, Wilson e Danilo.

E, por fim, ao meu Pai, que apesar de termos passado poucos momentos juntos, os foram suficientes para amá-lo.

***Entrega o teu caminho ao Senhor, confia nele, e ele tudo fará***  
**Salmos 37:5**

## RESUMO

A durabilidade das estruturas de concreto armado é prejudicada pela ação deteriorante da penetração de substâncias na forma de gases, vapores e líquidos através de poros e fissuras. Sabe-se que a água, tanto no seu estado puro ou com íons dissolvidos, como os cloretos, sulfato, dióxido de carbono ou oxigênio, pode comprometer a durabilidade das estruturas de concreto. Em estruturas de concreto armado localizadas em ambiente marítimo como, por exemplo, as torres de energia eólica, essa deterioração pode ser mais intensa e acelerada. Diante disso, no presente trabalho foram analisados concretos com diferentes adições minerais (sílica ativa e escória de alto-forno) e relações água/aglomerante (0,35; 0,45 e 0,55), tendo como objetivo principal verificar se a parte interna e o revestimento do concreto exercem algum efeito nos mecanismos de transporte e, se o efeito da carbonatação (somente para concretos de relação a/g igual a 0,55) na camada superficial do concreto é relevante a ponto de dificultar a entrada de agentes agressivos no concreto. Para isso, foram realizados os seguintes ensaios para avaliar o transporte de massa no concreto: absorção de água por capilaridade (NBR 9779:1995), penetração de água sob pressão (NBR 10787:1994), permeabilidade ao ar (método de Figg), penetrabilidade de cloretos (ASTM C 1202: 2009), ensaio de migração em regime não estacionário (NT BUILD 492:1999). Como resultado constatou-se que as adições minerais empregadas propiciaram de maneira geral uma melhoria dos concretos frente aos mecanismos de transporte de massa. Em uma das propriedades avaliadas, a saber, o coeficiente de difusão (migração – regime não estacionário) dos concretos com o emprego de sílica ativa e escória de alto-forno, esse foi reduzido drasticamente, em torno de 11 vezes para os concretos com relação a/ag igual a 0,55, quando comparado com os concretos sem adição mineral. Quanto à região do concreto, notou-se para algumas propriedades (absorção capilar, penetração de água sob pressão, penetrabilidade de cloretos) que a região interna comportou-se melhor, de maneira inesperada, que a região do revestimento. Diante dessa conclusão, criou-se uma hipótese para tal comportamento que consistiu em afirmar que a parte interna é composta por zonas de transição (interface agregado/pasta) expostas que facilitam a entrada de fluidos, gases e íons. Já com relação ao efeito da carbonatação, esta afetou a absorção capilar e a permeabilidade ao ar. Os resultados levaram a explicar que a colmatação dos poros, advindos do produto ( $\text{CaCO}_3$ ) da carbonatação promoveu o refinamento dos poros, aumentando, assim, a força capilar e, conseqüentemente, o aumento da absorção capilar. No entanto, para permeabilidade ao ar esse efeito dificultou a passagem de ar através da camada superficial. Por último, cabe destacar, que correlações importantes foram obtidas entre os ensaios que avaliaram os mecanismos de transporte de massa, a saber, penetrabilidade de cloretos e absorção capilar, coeficiente de difusão (migração – regime não estacionário) e absorção capilar, permeabilidade ao ar e penetração de água sob pressão, penetrabilidade de cloreto e coeficiente de difusão.

**Palavras-chave:** Concreto. Adições minerais. Sílica ativa. Escória de alto forno. Absorção capilar. Permeabilidade. Coeficiente de difusão. Migração – regime não estacionário. Penetrabilidade de cloretos. Mecanismo de transporte.

## ABSTRACT

The durability of reinforced concrete structures is damaged by the degrading action of the penetration of substances in the form of gases, vapors and liquids through the pores and cracks. It is known that water both in its pure form or containing dissolved ions such as chloride, sulphate, carbon dioxide or oxygen ions, can compromise the durability of concrete structures. In reinforced concrete structures at the marine environment, for example, the towers of wind power plants, this degradation can be more intense and accelerated. Thus, in the present study were analyzed concretes with different mineral additions (silica fume, blast furnace slag) and water / binder ratios (0.35, 0.45 and 0.55), with the objective to verify if the inside and cover thickness of concrete have some effect on the mechanisms of transport and also the effect of carbonation (only for concrete with w/b equal to 0.55) in the surface layer of concrete is important enough to make difficult the entry of aggressive agents in concrete. For this, the following tests to evaluate the mass transport in concrete were performed: capillary water absorption (NBR 9779:1995), water penetration under pressure (NBR 10787:1994), air permeability (method Figg), penetrability of chloride ion (ASTM C 1202: 2009), non-steady-state migration test (NT BUILD 492:1999). As a result, it was found that the mineral addition used generally provided an improvement in front of the concrete mechanisms of mass transport. In one of the properties, namely the diffusion coefficient (non-steady-state migration) of concrete with the use of silica fume and blast furnace slag, this has been reduced dramatically, around 11 times for the concrete with w/b equal to 0.55, when it is compared with concrete without mineral addition. It was observed that the inner region of concrete behaved better, in an unexpected way, than concrete cover region for some properties (capillary absorption, water penetration under pressure, penetration of chloride ions). From this conclusion, it can be said that the inner part of concrete is composed of transition zones (aggregated interface / mortar) exposed to facilitate the entry of fluids, gases and ions. About the effect of carbonation, this affected the capillary absorption and air permeability. The results led to explain that the clogging of the pores resulting from the product of carbonation ( $\text{CaCO}_3$ ), promoted the refinement of the pores, thus increasing capillary force and, consequently, increasing the capillary absorption. However, for air permeability this effect has damaged the passage of air through the surface layer. Finally, it is important noting that significant correlations were found among tests that evaluated the mechanisms of mass transport, namely, penetration of chloride ions and capillary absorption, diffusion coefficient (non-steady-state migration) and capillary absorption, permeability air and water penetration under pressure, penetration of chloride ions and the diffusion coefficient.

**Keywords:** Concrete. Mineral addition. Silica fume. Blast furnace slag. Capillary absorption. Permeability. Diffusion coefficient. Non-steady-state migration. Penetration of chloride ions. Transport mechanism.

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 – Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca do concreto referência (ROSSIGNOLO, 2005). .....	8
Figura 2.2– Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca do concreto com 10% de sílica ativa (ROSSIGNOLO, 2005). .....	9
Figura 2.3 – Estrutura porosa do concreto (ROSTAM et al., 1993 apud CASCUDO, 1997). .....	11
Figura 2.4 – Diferença entre porosidade e permeabilidade (FERREIRA, 2000). .....	12
Figura 2.5 – Influência da relação a/c na porosidade total e capilar (NEVILLE, 1997). .....	12
Figura 2.6 – (a) Deslocamento da argamassa em direção à fôrma. (b) Distribuição heterogênia dos constituintes do concreto devido ao efeito parede (GEYER, GREVEN, 1999). .....	13
Figura 2.7 – Esquema do avanço da frente de carbonatação (MEDEIROS, HELENE, 2001). .....	15
Figura 2.8 – Efeito da carbonatação no coeficiente de permeabilidade do concreto (SONG, KWON, 2007). .....	16
Figura 2.9 – (a) Mudança na porosidade de concretos de relação a/c 0,65 submetidos a carbonatação. (b) Mudança na porosidade de concretos de relação a/c 0,55 submetidos a carbonatação (SONG, KWON, 2007). .....	16
Figura 2.10 – Esquema indicando a direção de fluxo de água em elemento saturado (SATO, 1998). .....	20
Figura 2.11 – Esquema do equipamento para medir permeabilidade ao oxigênio (KOLLER, 1989 apud NEPOMUCENO, 2005). .....	25
Figura 2.12 – Esquema básico do Método de Figg (LEÃO et al., 2001). .....	26
Figura 2.13 – Esquema do equipamento proposto por Torrent (1999), para ensaio de permeabilidade ao ar (NEPOMUCENO, 2005). .....	27
Figura 2.14 – Representação esquemática das forças que atuam num líquido dentro de um capilar (FERREIRA, 2003). .....	28
Figura 2.15 – Formas de penetração de cloretos em concreto (Adaptado de BORGES et al. apud ANDRADE, 2001). .....	30
Figura 2.16 – Cinética de absorção capilar (Adaptado de AZEVEDO, 2002). .....	31
Figura 2.17 – Perfil teórico considerando a contribuição da difusão (TANG, NILSSOM, 1992). .....	36

Figura 2.18 – Arranjo da célula de difusão (PAGE et al., 1981). .....	39
Figura 2.19 – Configuração do ensaio rápido de penetrabilidade de cloretos (adaptado de WHITING, 1981 apud CALÇADA, 2004). .....	41
Figura 2.20 – Correlação entre a profundidade de cloretos (método colorimétrico) e a carga total passante através do método ASTM C1202 (MECK, SIRIVIVATNANON, 2003). .....	43
Figura 2.21 – Esquema de ensaio de migração de cloretos (ANDRADE, 1993). .....	44
Figura 2.22 – Relação entre o coeficiente de difusão (ensaio de imersão) e coeficiente de difusão (migração regime estacionário) através do método rápido proposto por Yang (Adaptado de YANG, 2005). .....	44
Figura 2.23 – Arranjo experimental do ensaio proposto por Tang e Nilsson (TANG, NILSSON, 1992; NT BUILT: 1999). .....	46
Figura 2.24 – Comparação entre o método proposto por Tang e Nilsson (1992) e o ensaio de imersão, com cálculo da difusividade pela segunda lei de Fick (TANG, 1996). .....	47
Figura 2.25 – Correlação entre a difusividade de cloretos dos dois regimes (estacionário e não estacionário) através de ensaio de migração (TONG, GJØRV, 2001). .....	48
Figura 3.1 – Fluxograma das combinações do trabalho experimental. ....	52
Figura 3.2 – Difratoograma de raios X da escória de alto-forno. ....	57
Figura 3.3 – Difratoograma de raios X da sílica ativa. ....	58
Figura 3.4 – Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo. ....	60
Figura 3.5 – Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo. ....	62
Figura 3.6 – Fôrmas dos protótipos de viga: (a) fôrma de dimensões 20 cm x 20 cm x 52 cm, (b) fôrma de dimensões 20 cm x 25 cm x 65 cm. ....	66
Figura 3.7 – Vista geral das fôrmas de madeira e das armaduras para moldagem do protótipos prismáticos de viga de concreto. (a) armação referente ao protótipo de dimensões 20 cm x 20 cm x 52 cm, (b) armação referente ao protótipo de dimensões 20 cm x 25 cm x 65 cm. ....	67
Figura 3.8 – Sala de dosagem do concreto: (a) betoneira utilizada e (b) os concretos no estado fresco referente a um tipo de concreto. ....	68
Figura 3.9 – Câmara úmida: (a) vista geral da câmara úmida e (b) disposição dos corpos-de-prova do presente estudo, na câmara úmida. ....	69
Figura 3.10 – Local de armazenamento dos corpos-de-prova: (a) vista geral dos corpos-de-prova armazenados; (b) corpos-de-prova não carbonatados, envolvidos com um filme de polietileno. ....	69
Figura 3.11 – Processo de extração dos corpos-de-prova cilíndricos do concreto, dos protótipos de viga. ....	70

Figura 3.12 – Protótipos de viga após a extração de corpos-de-prova cilíndricos : protótipo de 20 cm x 25 cm 60de dimensão com furos, devido a extração de cilindros de dimensões: (a (10 x 20) cm.....	71
Figura 3.13 – Realização do ensaio de resistência à compressão.....	72
Figura 3.14 – Esquema de aproveitamento do cilindro extraído para o ensaio de porosidade e para a obtenção da altura capilar. ....	73
Figura 3.15 – Ensaio de porosidade: (a) saturação das amostras, (b) coleta da massa da amostra, (c) coleta da massa hidrostática.....	74
Figura 3.16 – Processo de medida de carbonatação dos concretos.....	75
Figura 3.17 – Processo de obtenção dos cubos de concreto para o ensaio de absorção capilar.....	77
Figura 3.18 – Ensaio de absorção por capilaridade:(a) corpos-de-prova cúbicos de concreto na estufa, (b) os cubos de concreto sendo submetidos ao ensaio, (c) coletando-se a massa da amostra.....	78
Figura 3.19 – Processo de obtenção da altura capilar através do ensaio de absorção capilar.....	78
Figura 3.20 – Processo de preparação dos corpos-de-prova para o ensaio de penetração de água sob pressão.....	79
Figura 3.21 – Preparação do corpo-de-prova de penetração de água sob pressão: (a) detalhe da colagem, (b) detalhe do corpo-de-prova já colado.....	80
Figura 3.22 – Detalhe do aparato de ensaio do método de penetração de água sob pressão.....	80
Figura 3.23 – Coletas de medidas de penetração de água.....	81
Figura 3.24 – Execução dos furos para preparação do ensaio de permeabilidade ao ar.....	81
Figura 3.25 – Preparação dos furos para execução do ensaio permeabilidade ao ar.....	82
Figura 3.26 – Sistema de vedação e disposição da agulha no furo.....	83
Figura 3.27 –Ensaio de permeabilidade ao ar.....	84
Figura 3.28 –Esquema de aproveitamento do cilindro de concreto para o ensaio de penetrabilidade de cloretos e, também, para o ensaio de migração em regime estacionário.....	84
Figura 3.29 – (a) Ensaio de penetrabilidade de cloretos sendo executado; (b) detalhe da célula do ensaio de penetrabilidade de cloretos.....	85
Figura 3.30 – Proposta de esquema de ensaio de migração (regime não estacionário), que foi elaborada e utilizada no presente estudo.....	86
Figura 3.31 – Preparação do ensaio de migração (regime não estacionário): (a) amostra inserida na cinta de borracha e, (b) selando o perímetro superior da amostra junto à cinta.....	87

Figura 3.32 – Detalhe da junção da cinta de borracha com o tubo de PVC, formando um “copo” para solução anódica. ....	88
Figura 3.33 – Apresentação dos eletrodos: (a) ânodo; (b) cátodo e (c) ilustração do posicionamento dos eletrodos. ....	88
Figura 3.34 – Ilustração das posições das diferentes soluções. ....	88
Figura 3.35 – Detalhe da medida e nitidez que a solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) confere ao indicar a frente de ingresso de cloretos no concreto. ....	89
Figura 4.1 – Valores médios de resistência à compressão em função do tipo de concreto (adição mineral) referente a relação água/aglomerante 0,35. ....	92
Figura 4.2 – Valores médios de resistência à compressão em função do tipo de concreto (adição mineral) referente a relação água/aglomerante 0,45. ....	92
Figura 4.3 – Valores médios de resistência à compressão em função do tipo de concreto (adição mineral) referente a relação água/aglomerante 0,55. ....	93
Figura 4.4 – Valores médios de porosidade acessível à água para cada tipo de concreto em função da relação a/ag. ....	94
Figura 4.5 – Valores médios globais em função do tipo de concreto: (a) altura capilar, (b) raio médio dos poros. Com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	97
Figura 4.6 – Valores médios globais em função da relação a/ag: (a) altura capilar, (b) raio médio dos poros. Com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	98
Figura 4.7 – Valores médios de absorção capilar para tipo de concreto em função da relação a/ag. (RI – região interna / RC – região do cobrimento) ....	101
Figura 4.8 – Valores médios globais de absorção capilar em função da relação água/aglomerante, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	102
Figura 4.9 – Valores médios globais de absorção capilar em função do tipo do concreto (adição), com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	103
Figura 4.10 – Valores médios globais de absorção capilar em função da região do concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	104
Figura 4.11 – Aparência superficial dos concretos estudados: (a) concreto referência; (b) concreto com sílica ativa; (c) concreto com escória de alto-forno. ....	106
Figura 4.12 – Valores médios de permeabilidade ao ar para cada tipo de concreto em função da relação a/ag. ....	107

Figura 4.13 – Valores médios globais de permeabilidade ao ar em função da relação água/aglomerante, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	108
Figura 4.14 – Valores médios globais de permeabilidade ao ar em função do tipo de concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	109
Figura 4.15 – Valores médios de penetração de água sob pressão para cada tipo de concreto em função da relação a/ag (RI – região interna/RC – região do cobrimento).....	112
Figura 4.16 – Valores médios globais de penetração de água sob pressão em função da relação água/aglomerante, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	113
Figura 4.17 – Valores médios globais de penetração de água sob pressão em função do tipo de concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	114
Figura 4.18 – Valores médios globais de penetração de água sob pressão em função da região do concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	115
Figura 4.19 – Valores médios de penetrabilidade de cloretos para cada tipo de concreto em função da relação a/ag (RI – região interna/RC – região do cobrimento). ....	118
Figura 4.20 – Valores médios globais de penetrabilidade de cloretos em função da relação a/ag, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	119
Figura 4.21 – Valores médios globais de penetrabilidade de cloretos em função do tipo de concreto (adição), com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	120
Figura 4.22 - Valores médios globais de penetrabilidade de cloretos em função da região do concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	121
Figura 4.23 – Valores médios de coeficiente de difusão (ensaio de migração - regime não estacionário) para cada tipo de concreto em função da relação a/ag (RI – região interna/RC – região do cobrimento). ....	124
Figura 4.24 - Valores médios globais do coeficiente de difusão (regime não estacionário) em função da relação a/ag, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	125
Figura 4.25 - Valores médios globais do coeficiente de difusão (regime não estacionário) em função do tipo de concreto (adição), com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.....	126

Figura 4.26 – Valores médios globais de absorção capilar: (a) em função relação da água/aglomerante e (b) em função da região do concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que deferem significativamente.....	129
Figura 4.27 – Valores médios globais de absorção capilar em função da carbonatação com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que deferem significativamente.....	130
Figura 4.28 – Valores médios globais de permeabilidade ao ar em função do tipo de concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	132
Figura 4.29 – Valores médios globais de permeabilidade ao ar em função da carbonatação, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	133
Figura 4.30 – Valores médios globais de penetração de água sob pressão: (a) em função do tipo de concreto, (b) em função da região do concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que deferem significativamente.....	136
Figura 4.31 – Valores médios globais de penetrabilidade de cloretos em função do tipo de concreto (adição), com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	139
Figura 4.32 - Valores médios globais de penetrabilidade de cloretos em função da região do concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. ....	140
Figura 4.33 - Valores médios globais do coeficiente de difusão (regime não estacionário) em função do tipo de concreto (adição), com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.....	143
Figura 4.34 – Correlação entre os dados individuais de coeficiente de difusão (ensaio de migração – regime estacionário) e os dados individuais das cargas passantes de penetrabilidade de cloretos.....	145
Figura 4.35 – Regressão tipo exponencial entre os resultados médios da região do cobrimento de penetrabilidade de cloretos e absorção por capilaridade. ....	145
Figura 4.36 – Regressão tipo exponencial entre os resultados médios da região do cobrimento do coeficiente de difusão (ensaio de migração – regime estacionário) e absorção por capilaridade.....	146
Figura 4.37 – Concreto de escoria no estado fresco, mostrando seu aspecto superficial irregular.. ....	147
Figura 4.38 – Regressão tipo exponencial entre os resultados médios da região do cobrimento de permeabilidade ao ar e penetração de água sobre pressão. ....	148

Figura 4.39 – Regressão tipo exponencial entre os resultados médios da região do cobrimento de permeabilidade ao ar e penetração de água sobre pressão (desconsiderando os concretos sem adição das relações a/ag iguais a 0,35 e 0,45)..... 148

Figura B.1 – a) Aspecto geral da rocha, mostrando a textura granular alotriomórfica. Quartzo (1), microclínio (2), plagioclásio (3) e muscovita (4). Nicóis cruzados..... 157

## LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1 – Critérios de avaliação da permeabilidade à água do concreto segundo o CEB-192 (CEB 192).....	23
Tabela 2.2 – Classificação do tipo de material cimentício em função do tempo de permeabilidade (CATHER et al, 1984).....	26
Tabela 2.3 – Classes de qualidade do concreto em função do seu coeficiente de absorção capilar (BROWNE, 1991 apud AZEVEDO, 2002).....	32
Tabela 2.4 – Métodos para determinação dos coeficientes de difusão de cloretos (Adaptado de SALTA, 1999; FERREIRA, 2000). ....	38
Tabela 2.5 – Classificação do concreto frente a penetrabilidade de cloretos, através da carga total passante (ASTM C1202 : 2009). ....	42
Tabela 2.6 – Classes de resistência do concreto à penetração de cloretos (GJØRV, 2001) .....	48
Tabela 3.1 – Caracterização física e mecânica do cimento: CP II F-32.....	54
Tabela 3.2 – Caracterização química do cimento: CP II F-32.....	55
Tabela 3.3 – Caracterização química e física da escória de alto-forno moída.....	56
Tabela 3.4 – Caracterização química e física da sílica ativa. ....	57
Tabela 3.5 – Caracterização do agregado miúdo.....	59
Tabela 3.6 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	60
Tabela 3.7 – Caracterização do agregado graúdo. ....	61
Tabela 3.8 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo. ....	62
Tabela 3.9 - Caracterização do aditivo químico superplastificante. ....	63
Tabela 3.10 – Proporcionamento dos concretos estudados.....	64
Tabela 3.11 – Caracterização do concreto no estado fresco.....	64
Tabela 3.12 – Nomenclatura adotada para os vários concretos da pesquisa.....	65
Tabela 4.1 – Resultados médios de resistência à compressão.....	91
Tabela 4.2 – Resultados médios da porosidade acessível à água do concreto.....	93
Tabela 4.3 – Resultados médios de altura capilar e raio médio dos poros do concreto. ....	95

Tabela 4.4 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de raio médio dos poros, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico. ....	96
Tabela 4.5 – Resultados médios e situação de carbonatação dos concretos. ....	98
Tabela 4.6 – Resultados médios de absorção capilar. ....	99
Tabela 4.7 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de absorção capilar, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico. ....	100
Tabela 4.8– Resultados médios de permeabilidade ao ar, com as respectivas classificações conforme a proposta de Cather et al (1984). ....	105
Tabela 4.9 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de permeabilidade ao ar, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico. ....	106
Tabela 4.10 – Resultados médios de penetração de água sob pressão. ....	110
Tabela 4.11 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de penetração de água sob pressão, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico. ....	111
Tabela 4.12 – Resultados médios de carga passante e classificação de acordo com a ASTM C 1202 : 2009. ....	116
Tabela 4.13 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de carga passante, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico. ....	117
Tabela 4.14 – Resultados médios de coeficientes de difusão e classificação de acordo com a proposta de GjØrv (2001). ....	122
Tabela 4.15 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de coeficiente de difusão (ensaio de migração – regime não estacionário) para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico. ....	123
Tabela 4.16 – Resultados médios de absorção capilar. ....	127
Tabela 4.17 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de absorção capilar, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico. ....	128
Tabela 4.18 – Resultados médios de permeabilidade ao ar, com as respectivas classificações conforme a proposta de Cather et al (1984). ....	131
Tabela 4.19 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de permeabilidade ao ar, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico. ....	131
Tabela 4.20 – Resultados médios de penetração de água sob pressão. ....	134
Tabela 4.21 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de penetração de água sob pressão, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico. ....	135

Tabela 4.22 – Resultados médios de carga passante e classificação de acordo com a ASTM C 1202 : 2009. ....	137
Tabela 4.23 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de carga passante, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico. ....	138
Tabela 4.24 – Resultados médios de coeficientes de difusão e classificação de acordo com a proposta de Gjrv (2001). ....	141
Tabela 4.25 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de coeficiente de difusão (ensaio de migração – regime estacionário), para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico. ....	142
Tabela A.1 - Diferença de potencial a ser aplicada e duração do ensaio, em função da corrente elétrica inicial do corpos-de-prova de concreto. ....	155
Tabela A.2 – Distribuição de Fisher – valores de tabelado (Ftab) para $\alpha = 0,05$ . ....	156
Tabela C.1 – Resultados individuais de resistência à compressão. ....	158
Tabela C.2 – Resultados individuais de porosidade, altura capilar e raio médio. ....	159
Tabela C.3 – Resultados individuais de absorção por capilaridade.....	160
Tabela C.4 – Resultados individuais de permeabilidade ao ar. ....	161
Tabela C.5 – Resultados individuais de penetração de água sob pressão.....	162
Tabela C.6 – Resultados individuais de penetrabilidade de cloretos.....	163
Tabela C.7 – Resultados individuais dos coeficientes de difusão (ensaio de migração). ....	164

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/ag - água/aglomerante (cimento + adição mineral )

a/c - água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – *American Concrete Institute*

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANOVA - Análise estatística de variância

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CEB – *Comitê Euro – International du Beton*

DCT.C – Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológicas

NBR – Norma Brasileira de Regulamentação

PPG/GECON – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil

P&D – Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico

## NOMENCLATURA DA QUÍMICA DO CIMENTO

Principais óxidos: C – CaO; S – SiO<sub>2</sub>; A – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; F – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; H – H<sub>2</sub>O; M – MgO; N – Na<sub>2</sub>O; K – K<sub>2</sub>O

C<sub>3</sub>S – silicato tricálcico.

C<sub>2</sub>S – silicato dicálcico.

C<sub>3</sub>A – aluminato tricálcico.

C<sub>4</sub>AF – ferroaluminato tetracálcico – ferrita.

CH ou Ca(OH)<sub>2</sub> – hidróxido de cálcio – portlandita.

Cl<sup>-</sup> – íon cloreto.

Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup> – relação iônica entre cloretos e hidroxilas.

C-S-H – silicato de cálcio hidratado.

C/S – relação CaO/SiO<sub>2</sub>.

C<sub>3</sub>A.CaCl<sub>2</sub>.10H<sub>2</sub>O - cloroaluminato de cálcio hidratado – sal de Friedel

KOH – hidróxido de potássio.

Mg(OH)<sub>2</sub> – hidróxido de magnésio – brucita.

NaOH – hidróxido de sódio.

Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> – equivalente alcalino (%Na<sub>2</sub>O + 0,658.%K<sub>2</sub>O).

OH<sup>-</sup> – íon hidroxila.

SiO<sub>2</sub> – sílica.

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – íon sulfato.

## SUMÁRIO

	Pág.
<b>1 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	3
<b>2 CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
2.1 ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO.....	7
2.1.1 Fase sólida.....	7
2.1.2 Fase líquida.....	9
2.1.3 Porosidade.....	10
2.1.4 Efeito parede.....	13
2.1.5 Carbonatação.....	13
2.1.6 Adições minerais.....	17
2.1.6.1 Sílica ativa.....	17
2.1.6.2 Escória de alto-forno.....	18
<b>2.2 PRINCIPAIS MECANISMOS DE TRASPORTE DE MASSA NO CONCRETO.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.1 Permeabilidade.....</b>	<b>20</b>
2.2.1.1 Principais métodos de ensaio para avaliar a permeabilidade no concreto.....	23
2.2.1.1.a Permeabilidade à água.....	23
2.2.1.2.b Permeabilidade aos gases.....	24
<b>2.2.2 Absorção capilar.....</b>	<b>27</b>
2.2.2.1 Ensaio para avaliar absorção capilar.....	30
<b>2.2.3 Difusão iônica.....</b>	<b>32</b>
<b>2.2.4 Migração.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.5 Aspectos gerais de alguns métodos para a previsão do ingresso de cloretos no concreto por migração ou difusão.....</b>	<b>37</b>
2.2.5.1 Métodos de difusão em condição estacionária.....	38
2.2.5.2 Métodos de difusão em condição não estacionária.....	39
2.2.5.3 Métodos elétricos.....	40
2.2.5.3.a Ensaio de penetrabilidade de cloretos.....	41
2.2.5.3.b Ensaios de migração em condições de fluxo Estacionário.....	43

2.2.5.3.c Ensaio de migração em condições de fluxo não estacionário com ênfase na proposta de Tang e Nilsson (1992).....	45
<b>3 CAPITULO 3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS.</b>	<b>49</b>
<b>3.1 VARIÁVEIS DO TRABALHO.....</b>	<b>50</b>
<b>3.2 PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO.....</b>	<b>53</b>
<b>3.3 MATERIAIS EMPREGADOS.....</b>	<b>54</b>
3.3.1 Cimento Portland.....	54
3.3.2 Adições minerais.....	55
3.3.3 Agregados.....	58
3.3.3.a Agregado miúdo.....	58
3.3.3.b Agregado graúdo.....	61
3.3.4 Aditivo.....	63
3.3.5 Aço.....	63
3.3.6 Concretos estudados.....	63
<b>3.4 CORPOS-DE-PROVA.....</b>	<b>65</b>
3.4.1 Moldagem, cura e armazenamento dos corpos-de-prova.....	67
3.4.2 Extração e preparação dos corpos-de-prova.....	70
<b>3.5 MÉTODOS.....</b>	<b>71</b>
<b>3.5.1 Propriedades e características do concreto no estado endurecido.....</b>	<b>71</b>
3.5.1.1 Resistência à compressão.....	72
3.5.1.2 Porosidade do concreto.....	72
3.5.1.3 Medidas de carbonatação.....	74
<b>3.5.2 Ensaio que avaliaram os mecanismos de transporte.....</b>	<b>76</b>
3.5.2.1 Absorção capilar.....	76
3.5.2.2 Penetração de água sob pressão.....	79
3.5.2.3 Permeabilidade ao ar.....	81
3.5.2.4 Penetrabilidade de cloretos.....	84
3.5.2.5 Ensaio de migração (regime não estacionário).....	85
<b>4 CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>90</b>
<b>4.1 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....</b>	<b>91</b>
4.1.1 Resistência à compressão.....	91
4.1.2 Porosidade do concreto.....	93
4.1.2.1 Altura capilar/Raio médio.....	95
4.1.3 Carbonatação.....	98

<b>4.2 RESULTADOS DOS MECANISMOS DE TRANSPORTE NO CONCRETO.....</b>	<b>99</b>
<b>4.2.1 Absorção capilar.....</b>	<b>99</b>
4.2.1.1 Influência da relação água/aglomerante.....	101
4.2.1.2 Influência da adição.....	102
4.2.1.3 Influência da região do concreto.....	104
<b>4.2.2 Permeabilidade ao ar.....</b>	<b>105</b>
4.2.1.1 Influência da relação água/aglomerante.....	107
4.2.1.2 Influência da adição.....	109
<b>4.2.3 Penetração de água sob pressão.....</b>	<b>110</b>
4.2.3.1 Influência da relação água/aglomerante.....	112
4.2.3.2 Influência da adição.....	113
4.2.3.3 Influência da região do concreto.....	114
<b>4.2.4 Penetrabilidade de cloretos.....</b>	<b>115</b>
4.2.1.1 Influência da relação água/aglomerante.....	118
4.2.1.2 Influência da adição.....	119
4.2.1.3 Influência da região do concreto.....	121
<b>4.2.5 Ensaio de migração (regime não estacionário).....</b>	<b>121</b>
4.2.1.1 Influência da relação água/aglomerante.....	124
4.2.1.2 Influência da adição mineral.....	125
<b>4.3 INFLUÊNCIA DA CAMADA CARBONATADA NAS PROPRIEDADES DE TRANSPORTE DE MASSA NO CONCRETO.....</b>	<b>126</b>
<b>4.3.1 Absorção capilar.....</b>	<b>127</b>
4.2.1.1 Influência da carbonatação.....	129
<b>4.3.2 Permeabilidade ao ar.....</b>	<b>131</b>
4.2.1.1 Influência da carbonatação.....	133
<b>4.3.3 Penetração de água sob pressão.....</b>	<b>134</b>
<b>4.3.4 Penetrabilidade de cloretos.....</b>	<b>136</b>
<b>4.3.5 Ensaio de migração (regime não estacionário).....</b>	<b>140</b>
<b>4.4 DISCUSSÃO GLOBAL DOS RESULTADOS.....</b>	<b>144</b>
<b>5 CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....</b>	<b>150</b>
<b>5.1 CONCLUSÕES.....</b>	<b>150</b>
<b>5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>153</b>
<b>5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....</b>	<b>154</b>
<b>ANEXO A - TABELAS AUXILIARES.....</b>	<b>155</b>
<b>ANEXO B - ANÁLISE PETROGRÁFICA – GRANITO.....</b>	<b>157</b>

<b>ANEXO C-RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS.....</b>	<b>158</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>165</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A presente dissertação de mestrado foi realizada no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (PPG-GECON/UFG), estando inserida na área de concentração de Construção Civil. O trabalho é parte de um projeto de pesquisa mais amplo intitulado: “Avaliação da Durabilidade de Estruturas de Concreto para Geração de Energia Eólica em Ambiente de Elevada Agressividade”. Trata-se de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) realizado com apoio e financiamento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e de Furnas Centrais Elétricas, conduzido em parceria com pesquisadores da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

### 1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA

Atualmente, as exigências de projeto já não são voltadas apenas para atender às resistências mecânicas, mas também aos critérios de durabilidade e vida útil, conceitos que têm sido cada vez mais considerados, tanto por aspectos econômicos quanto por aspectos sociais, notadamente dentro da visão contemporânea do desempenho, que visa atender exigências e necessidades de usuários. Entender a interação que ocorre entre as estruturas e o meio ambiente, do ponto de vista físico e químico, bem como modelar os fenômenos nela presentes, é de suma importância para subsidiar os projetistas a fim de que possam considerar em seus projetos os aspectos de durabilidade.

Diante disso, ganham cada vez mais importância os estudos que abordam as características relacionadas aos mecanismos de transporte de líquidos, gases e íons, em especial aqueles que tratam da penetração de agentes agressivos no concreto. Aliar, portanto, as propriedades de absorção, permeabilidade, difusão e migração à questão da durabilidade das estruturas de concreto, parece ser um caminho obrigatório no sentido da obtenção dos requisitos e especificações de desempenho.

A deterioração das estruturas de concreto armado se dá pela penetração de substâncias na forma de gases, vapores e líquidos através dos poros e fissuras. As forças causadoras do transporte dessas substâncias no concreto podem ser as diferenças de concentração, de pressão, de temperatura, de densidade ou de potencial elétrico ou, ainda, a sucção capilar.

Sabe-se que os mecanismos de transporte dependem das características físicas do concreto, tais como a porosidade, distribuição do tamanho dos poros, conectividade e tortuosidade do sistema de poros. E, por sua vez, essas características dependem da fração volumétrica de cada material, da hidratação do cimento e do processo de produção do concreto (NEPOMUCENO, 2005).

Tendo em vista essas questões, justifica-se estudar os mecanismos de transporte de massa no concreto visando à obtenção de critérios de durabilidade e vida útil para as estruturas. A preocupação com a durabilidade é, sobretudo, uma ação de defesa do consumidor e de preservação do usuário, uma vez que envolve aspectos como a segurança estrutural, além dos altos custos com manutenção e recuperação. Nesse sentido, na presente pesquisa, preocupou-se em avaliar alguns tipos de concreto por meio de ensaios correlatos com os transportes de massa (permeabilidade, absorção, migração, difusão), visando contribuir de forma geral para os estudos em durabilidade do concreto. Em especial, a pesquisa teve como uma de suas finalidades fornecer parâmetros que contribuíssem para a especificação de concretos mais duráveis com um melhor custo-benefício, no contexto da produção de torres de energia eólica (com corpo estrutural em concreto armado ou protendido) em ambientes marinhos.

## **1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o comportamento de concretos com a incorporação de sílica ativa ou escória de alto-forno, tendo variações da relação água/aglomerante, frente aos mecanismos de transporte de massa no concreto endurecido. Como a premissa principal do trabalho é a de que existe diferença de desempenho quanto à durabilidade entre o concreto de cobertura e o concreto do interior do elemento estrutural, constituiu-se também objetivo do trabalho verificar se há diferença nos mecanismos de transporte nessas duas regiões do concreto estrutural (cobertura e parte interna).

Os objetivos específicos do trabalho são os seguintes:

- Comparar e verificar se existem diferenças significativas entre os tipos de concreto, em função da presença de adições minerais (sílica ativa ou escória de alto-forno) e da alteração da relação água/aglomerante (rel. a/ag 0,35; 0,45 e 0,55), nas suas propriedades relacionadas aos mecanismos de transporte (absorção por capilaridade, penetrabilidade de água sob pressão, permeabilidade ao ar, penetrabilidade de cloretos e migração de cloretos), bem como em relação à resistência à compressão e quanto às características de porosidade dos concretos;

- Comparar as regiões do corpo-de-prova, analisando a influência do cobrimento e da parte interna do concreto frente às propriedades de transporte de massa;
- Verificar se existem interações entre as variáveis independentes (relação água/aglomerante, adições minerais e região do concreto) frente às propriedades relacionadas com os mecanismos de transporte, assim como se há interação entre o efeito da carbonatação com as adições minerais e a região do concreto;
- Verificar nos concretos com maior relação água/aglomerante (rel. a/ag 0,55) sujeitos à carbonatação natural, se o efeito da carbonatação é um fator significativo no tocante aos mecanismos de transporte de massa;
- Verificar a existência de correlação entre as diferentes propriedades estudadas, a partir dos resultados dos ensaios.

### **1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Esta dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos. No primeiro capítulo tem-se a introdução da dissertação, onde são apresentadas a justificativa e a importância do tema, bem como os objetivos da pesquisa.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão de literatura sobre a estrutura interna do concreto, relatando as suas fases existentes (fase sólida, fase líquida e porosidade) e os principais fatores intervenientes na sua microestrutura, quais sejam, emprego de adições minerais, efeito da colmatação dos poros por meio da carbonatação, efeito parede e zona de transição. Em seguida é feita uma abordagem sobre as principais propriedades (permeabilidade, absorção, difusão e migração) relacionadas ao mecanismo de transporte de massa. Além disso, são relatados os principais ensaios para avaliá-los no concreto.

No capítulo 3 tem-se apresentada a metodologia do programa experimental, destacando-se as variáveis do experimento, os materiais utilizados, as características dos corpos-de-prova e os métodos utilizados para a obtenção dos resultados, visando atingir os objetivos propostos.

Prosseguindo, no capítulo 4, é realizada a análise e discussão dos resultados. Primeiramente, decidiu-se apresentar a resistência à compressão, porosidade, altura capilar e raio médio dos poros por se comportarem de maneira interessante e ajudarem a compreender os comportamentos relacionados ao mecanismo de transporte de massa. Em seguida, são apresentados os resultados das avaliações da absorção de água por

capilaridade, permeabilidade ao ar, penetração de água sob pressão, penetrabilidade de cloretos e o ensaio de migração em regime não estacionário. Nestas avaliações é discutida a influência das variáveis, a importância dos resultados na prática e correlações entre os ensaios que avaliaram o mecanismo de transporte de massa.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões, bem como as considerações finais e sugestões para futuras pesquisas extraídas do trabalho realizado.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO DA LITERATURA

A durabilidade do concreto é um dos mais importantes requisitos do concreto, pois é essencial que ele seja capaz de resistir às condições para as quais foi projetado durante toda vida útil prevista (NEVILLE; BROOKS,1997).

Segundo o Comitê 201 *do American Concrete Institute* (ACI, 2003 *apud* BRAUN,2003), a durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como sendo a capacidade desse concreto de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, ou seja, o concreto durável se conservará na forma original, com qualidade e com possibilidade de utilização, quando exposto ao meio ambiente.

A durabilidade reflete um conjunto de propriedades e sua mensuração direta no concreto apresenta grande complexidade. Para se garantir adequada durabilidade, há que se estabelecer, em projeto, o desempenho da estrutura de concreto, assim como os seus parâmetros mensuráveis. Neste contexto, ganham importância os mecanismos de transporte de fluidos (líquidos e gases) e de íons através da estrutura de poros do concreto.

Segundo Nepomuceno (2005), os principais mecanismos de transporte que atuam no concreto são os transportes de água por pressão ou por sucção capilar; a difusão de íons ou de espécies químicas devida a um gradiente de concentração, de temperatura ou de densidade, além do movimento de íons devido à movimentação da água, por diferença de pressão ou de sucção capilar, e também devido à migração, quando existe uma diferença de potencial.

O estudo desses mecanismos é relevante para o estabelecimento de parâmetros de projetos, os quais devem ser usados para garantir a vida útil das estruturas (NEPOMUCENO, 2005).

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura sobre os principais mecanismos de transporte de massa, ressaltando a importância deles dentro do estudo da durabilidade do concreto armado, com ênfase principalmente no ingresso de cloretos.

Assim, este capítulo se divide em dois itens principais: estrutura interna do concreto e mecanismos de transporte de massa.

No primeiro item é feita uma revisão acerca da estrutura interna do concreto, relatando as suas fases existentes (fase sólida, fase líquida e porosidade), em seguida, foca-se na sua microestrutura. Diante desta, abordam-se os principais fatores que a influenciam, quais sejam, emprego de adições minerais, efeito da colmatação dos poros por meio da carbonatação, efeito parede e zona de transição. Estes aspectos são discutidos pelo fato de que a durabilidade do concreto está diretamente ligada a sua microestrutura, a qual tem o poder de propiciar uma maior ou menor resistência aos agentes agressivos transportados por diferentes mecanismos.

No segundo item são abordados e definidos os mecanismos de transporte de massa envolvidos neste trabalho, a saber: permeabilidade, absorção capilar, difusão e migração. Para cada mecanismo foram relatados alguns métodos de ensaio, a fim de orientar na obtenção de parâmetros importantes que, por sua vez, dão subsídios para se fazer uma previsão da vida útil de uma estrutura de concreto armado.

## 2.1 ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO

Tratando-se de concreto, sua estrutura é heterogênea e altamente complexa. Em nível macroscópico, o concreto pode ser considerado um material bifásico, consistindo de partículas de agregado dispersas em uma matriz de cimento. Em nível microscópico torna-se mais complexa, haja vista que as duas fases da estrutura não se apresentam de forma homogênea e nem se encontram distribuídas de forma regular uma em relação a outra. A região de interface entre as partículas do agregado e a pasta representa uma terceira fase, a zona de transição (MEHTA, MONTEIRO, 1994).

É de extrema importância o entendimento da microestrutura do concreto, pois nela há o transporte de gases, água e agentes agressivos dissolvidos, sendo que a velocidade e o efeito do transporte são largamente influenciados pela estrutura porosa. Entende-se como estrutura porosa a quantidade de poros e a distribuição dos tamanhos dos poros (CEB 12, 1993; FERREIRA, 2000).

Pode-se de outra forma caracterizar o concreto, em nível microestrutural, como constituído de três fases: fase sólida, fase líquida e fase poros (SALTA 1999; HOFFMANN 2001).

### 2.1.1 Fase sólida

A fase sólida do concreto é constituída pelos agregados (grauído e miúdo), pasta de cimento hidratada e interface pasta-agregado, ou seja, zona de transição (HOFFMANN, 2001).

Os agregados são responsáveis principalmente pela massa específica, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. As características físicas, tais como: volume, porosidade, forma e textura do agregado grauído são os fatores mais relevantes que influenciam nas propriedades do concreto (MEHTA, MONTEIRO, 1994).

A pasta é formada pela mistura de água com um ou mais aglomerantes, que funcionam como elementos ativos, pois sofrem transformações químicas promovendo a união entre grãos do material geralmente inertes (agregados). A estrutura da pasta de cimento hidratada irá influenciar na facilidade ou dificuldade dos agentes agressivos adentrarem no concreto (NEVILLE, 1997).

Por meio das reações de hidratação do cimento anidro são formadas quatro fases sólidas principais presentes na pasta de cimento hidratada, as quais são, silicato de cálcio hidratado

(C-S-H), hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), sulfoaluminatos de cálcio hidratado e grãos de cimento não hidratado, que encontram-se descritas por vários autores como, Mehta, Monteiro (1994); Neville (1997); Hoffmann (2001); Kihara, Centurione (2005). Dentre estas fases, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) destaca-se como a fase sólida mais importante, pelo fato de ser um composto insolúvel e o principal componente que confere resistência mecânica ao concreto, formado a partir das reações de hidratação dos compostos  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$  do cimento anidro, dando um volume de sólidos de 50% a 60% na pasta de cimento hidratado (NEVILLE, 1997).

A zona de transição (ZT), região de interface entre as partículas de agregado e a pasta. É uma camada delgada, de 10  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$  de espessura ao redor do agregado graúdo (MEHTA, MONTEIRO, 1994; SALTA, 1999). Sendo considerada uma região geralmente mais fraca e porosa do que os outros componentes principais do concreto, influenciando negativamente no comportamento mecânico e na durabilidade do concreto (MEHTA, MONTEIRO, 1994; ISAIA, 1995; AITCIN, 2000). Diante disso, as adições minerais, devido à reduzida dimensão das partículas, permitem melhorar a zona de transição, preenchendo os seus espaços vazios, além da sua reatividade também contribui para a formação de produtos cristalinos (C-S-H) que vão ajudar a colmatar os poros capilares (SALTA, 1999).

Rossignolo (2005) constatou que a utilização de sílica ativa provoca a redução significativa da espessura da zona de transição agregado-matriz, além da diminuição do teor de CH nessa região, em comparação ao concreto de referência, que pode ser constatada pela redução dos valores da relação Ca/Si na zona de transição (Figura 2.1 e 2.2).

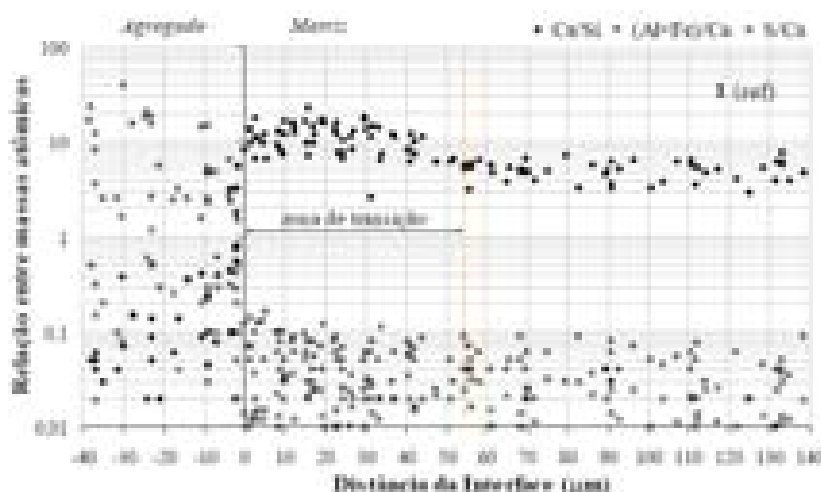


Figura 2.1 – Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca do concreto referência (ROSSIGNOLO, 2005).

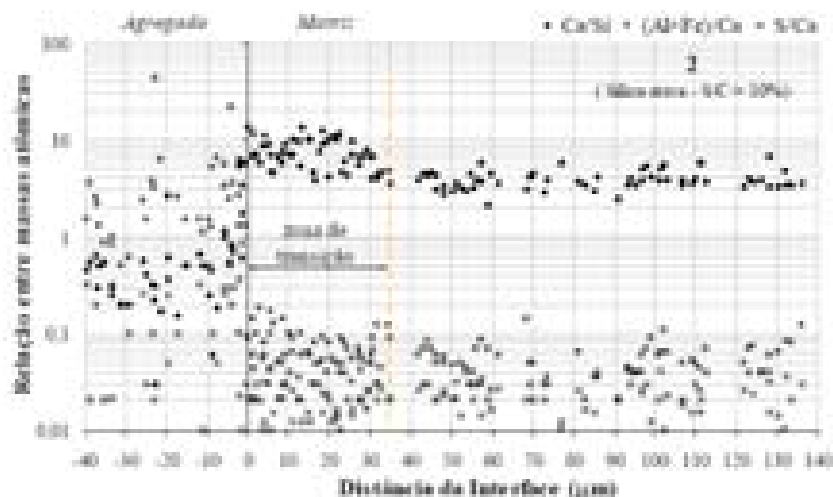


Figura 2.2– Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca do concreto com 10% de sílica ativa (ROSSIGNOLO, 2005).

Rossignolo (2005) obteve a redução de 36% da espessura da zona de transição de concreto com a utilização de 10% de sílica ativa, em relação à massa de cimento. Isto pode ser explicado pelos seguintes fatores: maior dificuldade da água fluir no concreto fresco, causando assim menor acúmulo de água de exsudação na superfície do agregado, presença de vários núcleos de cristalização que contribuem para a formação de cristais menores de hidróxido de cálcio e com menor tendência de cristalização em orientações preferenciais, e a gradual densificação do sistema dos produtos de hidratação por meio de ações pozolânicas entre o hidróxido de cálcio e a sílica ativa.

### 2.1.2 Fase líquida

Segundo Mehta e Monteiro (1994) dependendo da umidade ambiente e da sua porosidade, a pasta de cimento é capaz de reter uma grande quantidade de água, podendo estar presente na pasta endurecida de várias formas. Essa água pode ser classificada de acordo com o grau de dificuldade ou facilidade com o qual, ela pode ser removida:

- **água combinada quimicamente ou água de constituição:** água de hidratação que se combinou com o cimento, tornando-se parte constituinte dos compostos hidratados. Esta água não é perdida na secagem a 100°C, e é liberada quando os produtos hidratados são decompostos por aquecimento, em temperaturas superiores a 100°C.
- **água de gel:** pode ser separada em duas frações: *água adsorvida* e *água interlamelar*. A primeira refere-se à água que está sob as partículas de gel adsorvidas fisicamente, sofrendo ação de forças superficiais, a sua perda é responsável pela retração da pasta na secagem. A segunda refere-se a água associada à estrutura do C-S-H, que é perdida somente por secagem forte, com UR abaixo de 11%, retraindo consideravelmente a estrutura do C-S-H.

- **água capilar:** água que está presente nos poros maiores que 50 Å. Pode ser descrita como o volume de água que está livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida. A água capilar pode ser dividida em duas categorias: a água em vazios de diâmetro maiores que 50 nm, a qual, pode ser considerada água livre, uma vez que, a sua remoção não causa variação de volume e, a água retida por tensão capilar em capilares de 5 a 50 nm, cuja remoção pode causar retração do sistema (LARA, 2003);

Quanto aos agentes agressivos, a água pode atuar como solvente, por sua notável habilidade de dissolver mais substâncias do que qualquer outro líquido conhecido. Estas substâncias dissolvidas na fase aquosa, como os álcalis, hidroxilas e sulfatos, podem causar decomposição química dos materiais sólidos presentes no concreto (HOFFMANN, 2001).

Sob enfoque da proteção das armaduras no concreto armado, é de fundamental importância o elevado pH da fase aquosa do concreto, devido à formação e manutenção da película passivadora sobre a superfície da armadura, propiciando valores desprezíveis de intensidade de corrosão (ANDRADE, 1992 *apud* LARA, 2003).

### 2.1.3 Porosidade

Sabe-se que a fase sólida do concreto é constituída pelos agregados e pela pasta. A parte sólida da pasta é formada pelo silicato de cálcio hidratado (C-S-H), pelo hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), pelos sulfoaluminatos e pelos grãos de cimento não hidratados, além de outros compostos menores. Em relação às características de porosidade do concreto, pode-se considerar que estas são devidas, principalmente, à pasta, já que, de forma geral, os agregados apresentam pequena permeabilidade (LARA, 2003).

A porosidade do concreto, no que diz respeito à distribuição do diâmetro dos poros, influencia fortemente a velocidade de transporte de massa. O tamanho dos poros na pasta de cimento abrange várias ordens de grandeza. De acordo com as características originais, os poros podem ser descritos como sendo poros de ar aprisionado, poros de ar incorporado, poros capilares e poros de gel, como se ilustra na Figura 2.3. Classificando os poros de uma forma mais geral, aparenta ser mais prático classificá-los em macroporos, poros capilares e microporos. São os poros capilares e os macroporos que têm importância em relação à durabilidade (GAAFAR, 1995 *apud* FERREIRA, 2000).

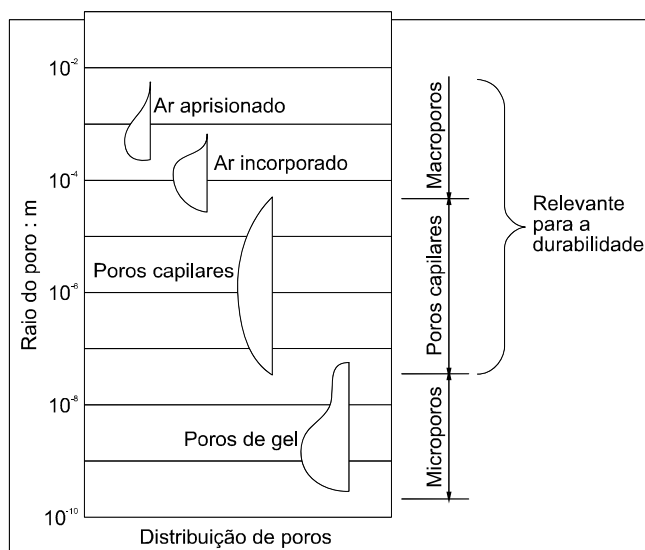


Figura 2.3 – Estrutura porosa do concreto (ROSTAM *et al.*, 1993 apud CASCUDO, 1997).

Os autores Mehta e Monteiro (1994) e Neville (1997) classificam por ordem de grandeza os tipos de poros mostrados na Figura 2.3, da seguinte maneira:

- **macroporos:** são os vazios incorporados e aprisionados à massa de concreto, apresentando dimensões bem maiores que os demais poros. Os vazios de ar incorporados são gerados por meio de aditivos que têm a finalidade de incorporar poros de formato esférico, não sendo influenciados pela relação a/c e não sendo também interconectados; podendo seus vazios variar de 50  $\mu\text{m}$  a 200  $\mu\text{m}$ . Já os vazios de ar aprisionados são advindos da operação de mistura, sendo que seus vazios podem chegar a 3  $\text{nm}$ . Ambos os tipos de vazios, segundo Lara (2003), são capazes de afetar negativamente a resistência e a impermeabilidade.
- **poros capilares:** são os espaços não ocupados pelo cimento ou pelos produtos de hidratação, originados nos espaços inicialmente ocupados pela água de amassamento em excesso que, antes da hidratação, provoca o afastamento dos grãos de cimento; a porosidade capilar é tanto maior quanto maior for a quantidade de água adicionada à mistura e quanto menor for o grau de hidratação do cimento;
- **poros gel:** são os espaços vazios entre os produtos de hidratação do cimento.

De acordo com Ferreira (2000) quando os diâmetros dos poros são reduzidos o material tem uma forte capilaridade e uma permeabilidade fraca e, inversamente, quando os diâmetros são grandes a capilaridade é pequena e a permeabilidade grande. A Figura 2.4 ilustra as diferenças entre porosidade e permeabilidade.

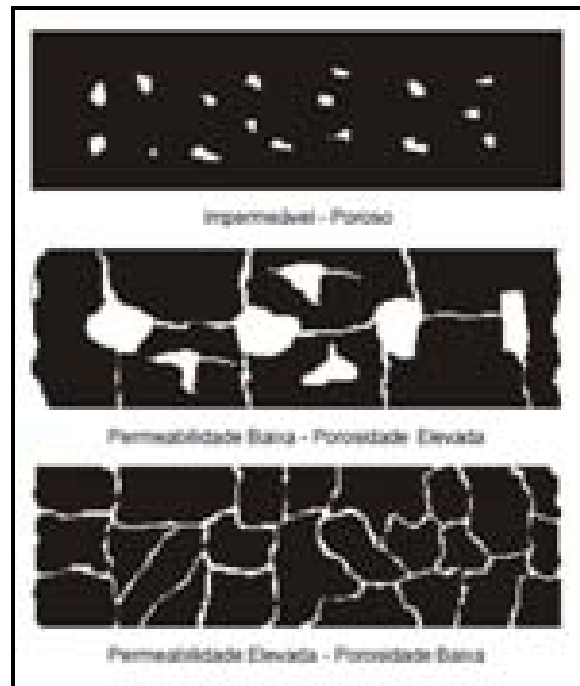


Figura 2.4 – Diferença entre porosidade e permeabilidade (FERREIRA, 2000).

Segundo Neville (1997), a relação água/cimento é o fator mais influente na porosidade do concreto, pois quanto mais baixa a relação água/cimento, menor será os poros interligados e, conseqüentemente, a porosidade do concreto será menor, como se observa no gráfico da Figura 2.5.

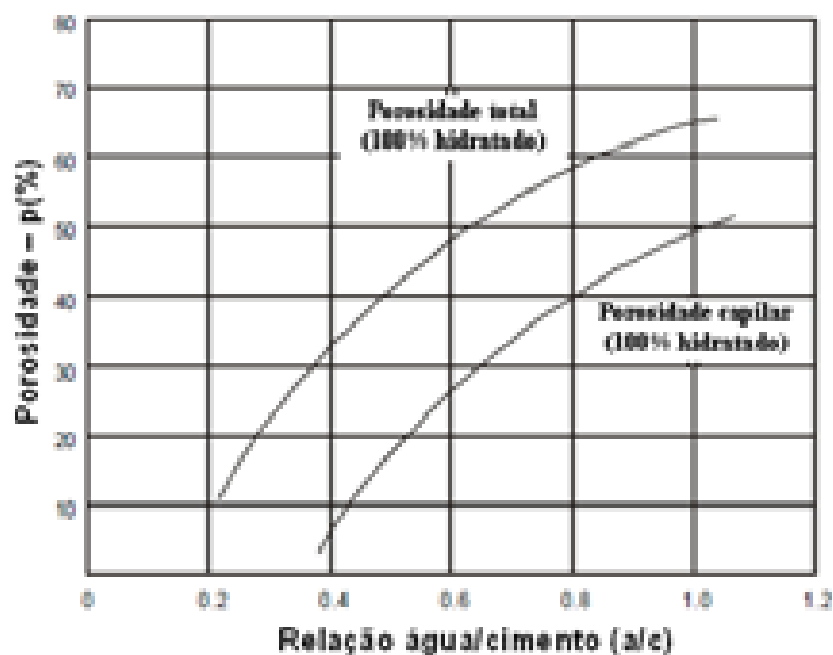


Figura 2.5 – Influência da relação a/c na porosidade total e capilar (NEVILLE, 1997).

### 2.1.4 Efeito parede

O efeito parede é a movimentação de argamassa para junto da superfície limite do concreto, tais como fôrmas, armaduras e os próprios agregados. A energia de compactação força a argamassa, confinada na massa interna do concreto, em direção à superfície, de encontro às fôrmas, conforme mostra a Figura 2.6 (GEYER, GREVEN, 1999). Esta argamassa deslocada é rica em água e, com isso, haverá diferenças de relação água/cimento e na porosidade entre a camada superficial e a massa interna do concreto (SILVA, 1995; GEYER, GREVEN, 1999; BRAUN, 2003).

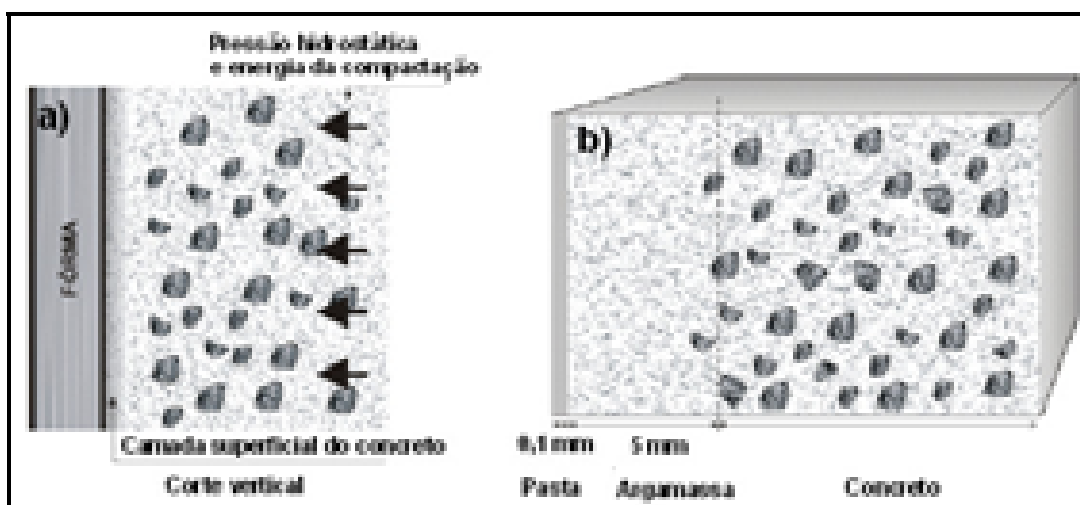


Figura 2.6 – (a) Deslocamento da argamassa em direção à fôrma. (b) Distribuição heterogênea dos constituintes do concreto devido ao efeito parede (GEYER, GREVEN, 1999).

Por fim, é importante ressaltar, segundo Neville (1997), o efeito parede é tanto mais acentuado quanto maior a relação área/volume do elemento de concreto em questão.

### 2.1.5 Carbonatação

Nas superfícies expostas das estruturas de concreto, a alta alcalinidade, obtida principalmente às custas da presença de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , liberado das reações de hidratação do cimento, pode ser reduzida com o tempo. Esta redução ocorre essencialmente pela ação do  $\text{CO}_2$  do ar, além de outros gases ácidos tais como  $\text{SO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  (HLADKY; DAWSON, 1981 apud CASCUDO, 1997). Esse mecanismo é chamado de carbonatação, que, de maneira resumida, consiste em transformar íons alcalinos como os cátions de sódio, potássio e, sobretudo, de cálcio, em carbonatos desses elementos, pela ação do dióxido de carbono presente no ar (CASCUDO, 2000).

O fenômeno da carbonatação envolve diversos mecanismos físico-químicos, a saber: difusão do CO<sub>2</sub> gasoso nos poros do concreto; dissolução e difusão do hidróxido de cálcio na água dos poros; dissolução do CO<sub>2</sub> na água dos poros e a reação com o hidróxido de cálcio. Também ocorre a reação do CO<sub>2</sub> com os álcalis dissolvidos e com os outros produtos de hidratação de cimento, fases silicatos e aluminatos hidratadas, que são menos solúveis (PAPADAKIS, 2000 apud CASTRO, 2003). Embora a reação principal de carbonatação seja entre o Ca(OH)<sub>2</sub> contido no concreto e o CO<sub>2</sub> do ambiente; devido à grande quantidade de Ca(OH)<sub>2</sub> na pasta hidratada, que constitui de 20% e 25% do volume de sólido, e também à sua maior solubilidade em comparação a outros produtos da pasta hidratada em comparação a outros produtos da pasta hidratada, como silicato de cálcio hidratado (CASTRO, 2003). Diante disso, cabe mostrar a reação básica de carbonatação, simplificada, conforme apresenta a Equação 2.1.



Embora possam ocorrer reações do tipo:



É importante salientar que as Equações (2.1; 2.2 e 2.3) são simplificadas. Na verdade o mecanismo ocorre em várias etapas envolvendo diversas reações secundárias, embora seja certo que um dos produtos finais seja sempre o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), segundo Schiessl citado por Cascudo (1997).

Quanto à velocidade da carbonatação, a umidade relativa do ambiente exerce influência sobre a quantidade de água contida nos poros do concreto e esta, por sua vez, condiciona a velocidade de difusão do CO<sub>2</sub> através dos poros do concreto. Segundo CEB/BI 148 (1982), as maiores taxas de carbonatação ocorrem quando a umidade relativa situa-se entre 50% a 60%. Já Rosenberg *et al.* (1989) observaram uma maior percentagem de carbonatação para as umidades relativas entre 50% e 70%.

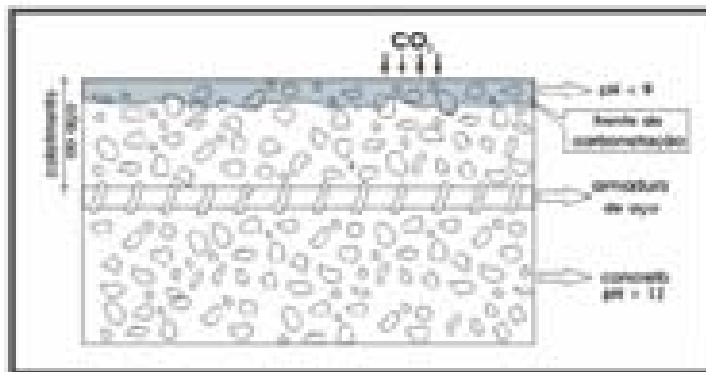


Figura 2.7 – Esquema do avanço da frente de carbonatação (MEDEIROS, HELENE, 2001).

Com o consumo de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) para a formação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), há uma redução do potencial hidrogeniônico (pH) da pasta, que passa de pH normalmente acima de 12 para pH abaixo ou em torno de 9. Uma característica desse mecanismo é a existência de uma “frente de carbonatação”, que separa essas duas zonas de pH, conforme mostra a Figura 2.7. Essa frente avança progressivamente para o interior do concreto e deve ser sempre mensurada com relação à espessura do concreto de cobertura da armadura, pois caso atinja a armadura, provocará a alteração das condições de estabilidade química da película passivadora do aço e, conseqüentemente, sua despassivação (CASCUDO 1997). Este efeito propiciado pela carbonatação é visto como um dos principais efeitos negativos diante da durabilidade do concreto.

Por outro lado, a carbonatação pode provocar um efeito benéfico ao concreto quando se considera a colmatação dos poros, ou seja, preenchimento dos vazios com o produto ( $\text{CaCO}_3$ ) gerado pela carbonatação. Este produto causa mudanças na microestrutura de argamassas e concretos diminuindo sua porosidade, que, por sua vez, causa mudanças nas propriedades relacionadas com a microestrutura, assim como permeabilidade, difusão de gases, absorção capilar, entre outros (SONG, KWON, 2007).

Bier (1987), Holly *et al.* (1993), Ngala (1997) analisaram os efeitos da carbonatação acelerada sobre a porosidade e as propriedades relacionadas com o transporte de massa de materiais cimentícios e constataram que, com a diminuição da porosidade total, há uma significativa melhora do concreto frente a essas propriedades.

Song e Kwon (2007) estudaram argamassas com duas relações água/cimento (0,55 e 0,65) submetidas à carbonatação e, por fim, observaram que a argamassa com relação a/c igual a 0,65 teve uma redução acentuada da permeabilidade, quando comparada com a argamassa de relação a/c igual a 0,55, conforme se nota na Figura 2.8. Isto se deve, pelo fato, segundo Russel *et al.* (2001), de que argamassas ou concretos com menores relações a/c, possuem menor número de poros e menor interconectividade destes poros, o que significa dizer que o

ganho da colmatção dos poros provenientes da carbonatação será menor, como mostra a Figura 2.9.

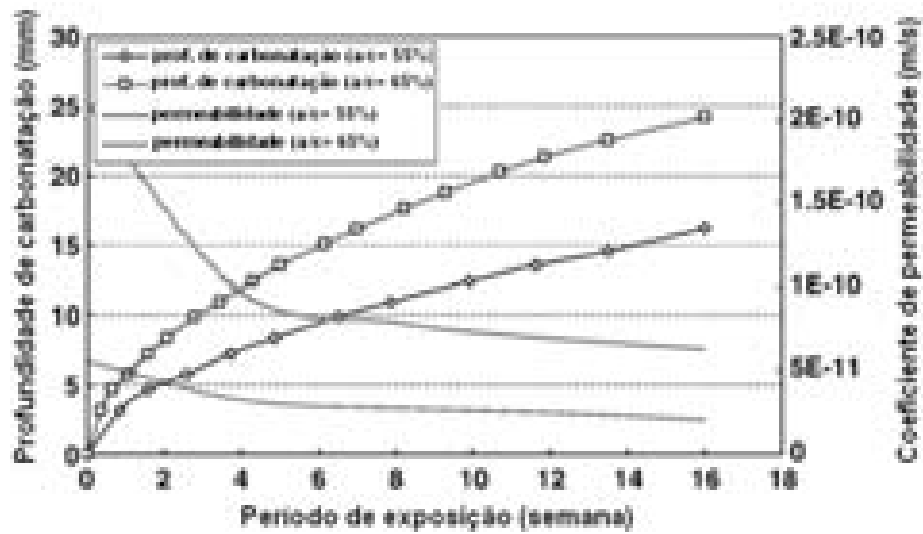


Figura 2.8 – Efeito da carbonatação no coeficiente de permeabilidade do concreto (SONG, KWON, 2007).

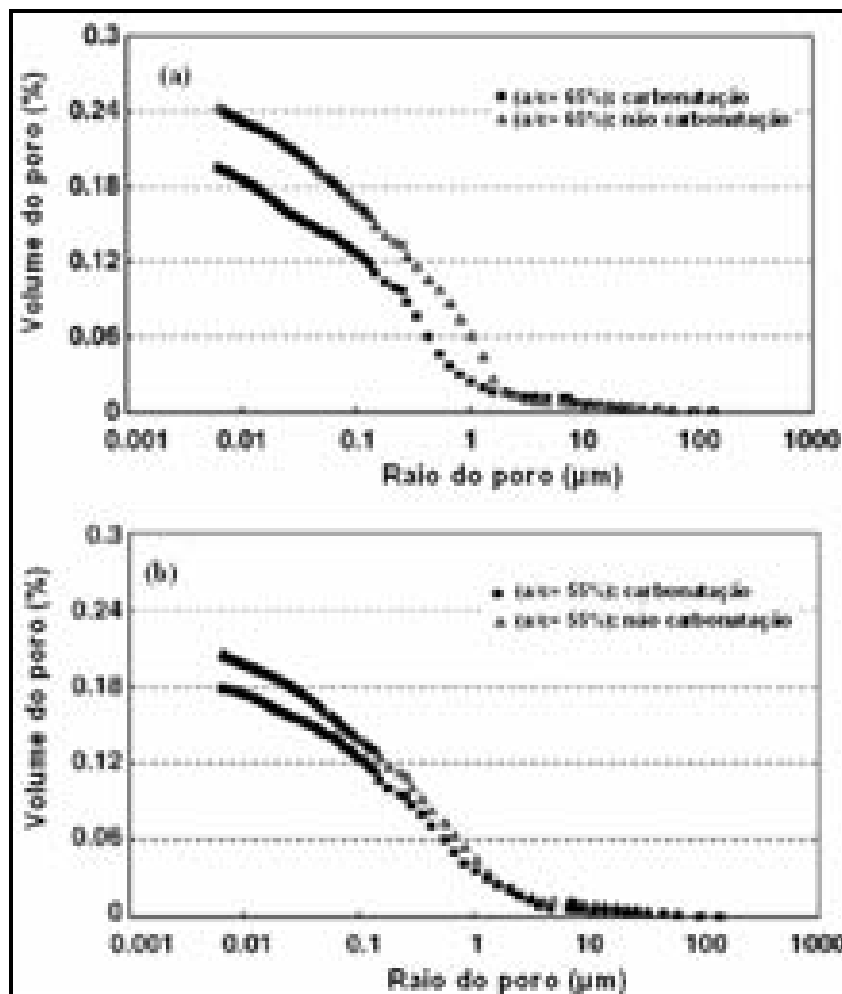


Figura 2.9 – (a) Mudança na porosidade de concretos de relação a/c 0,65 submetidos a carbonatação. (b) Mudança na porosidade de concretos de relação a/c 0,55 submetidos a carbonatação (SONG, KWON, 2007).

## 2.1.6 Adições minerais

Metha e Aïtcin (1990), afirmam que a substituição parcial do cimento Portland por adições minerais tem por objetivo melhorar a microestrutura do concreto em relação aos seguintes mecanismos:

- *as partículas pozolânicas* segmentam os canais de percolação da água na pasta de cimento, reduzindo a exsudação e segregação, causas primárias da falta de homogeneidade microestrutural no concreto;
- *as pequenas partículas de pozolana*, por serem menos reativas do que o cimento, ao serem dispersas na pasta, promovem inúmeros locais de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação, tornando a pasta mais homogênea em termos de distribuição de poros finos;
- *por efeito físico*, as partículas pequenas propiciam um maior empacotamento com o cimento e diminuem o efeito parede da zona de transição, promovendo o aumento da resistência do concreto.

Portanto, a introdução das adições minerais no concreto geralmente propicia uma melhora na microestrutura e, por conseqüência, na sua durabilidade. A seguir, são discutidas as contribuições das adições minerais, sílica ativa e escória de alto-forno, em algumas propriedades de transporte de massa. Estas adições foram enfocadas na revisão uma vez que foram as adotadas no trabalho experimental desta dissertação.

### 2.1.6.1 Sílica ativa

A sílica ativa é um subproduto da fabricação de silício metálico ou de ligas de ferro-silício a partir de quartzo de elevada pureza e carvão em fornos a arco e de indução. A redução de quartzo a silício em temperaturas de até 2000°C produz vapor de SiO que oxida e condensa em zonas de baixa temperatura, na forma de partículas esféricas minúsculas constituídas de sílica não cristalina; estas partículas são removidas por filtração dos gases de exaustão em filtros manga (FERREIRA, 2003).

De acordo com Dal Molin (2005) a sílica ativa é considerada uma superpozolana, pois apresenta alta reatividade e grande superfície específica, gerando, desta forma, reações rápidas. Além do efeito pozolânico, a sílica ativa também possui efeito fíler, proporcionando uma reorganização interna dos vazios. Diante disso, há uma redução considerável do tamanho dos poros e, ocasionalmente, também a sua obstrução, impedindo a passagem de

fluidos (SANCHEZ, 1997; FURQUIM, 2006). Para exemplificar o ganho com impermeabilidade, Nawi (1996) notou que a adição de 10% de sílica ativa em substituição ao cimento Portland no concreto reduziu o coeficiente de permeabilidade à água de  $1,6 \times 10^{-5}$  cm/s para  $4 \times 10^{-8}$  cm/s.

Ferreira (2003) constatou que concretos com adições minerais reduziram a penetrabilidade de cloretos em relação a concretos de referência. Em termos de média global, essas reduções foram de 87%, 81% e 76% para os concretos com misturas binárias no teor de 10% de sílica ativa, 10% de metacaulim e 25% de cinza volante, respectivamente. O tempo médio de ataque até que a armadura despassivasse, com base nos valores de potencial de corrosão, foi superior para os concretos com sílica ativa, metacaulim e cinza volante e menor para concretos sem estas adições minerais.

Segundo Bentz (2000) que utilizou 10% de sílica ativa em substituição ao cimento Portland, verificou que a difusividade do concreto a cloretos reduziu por mais de 15 vezes. Já Gjrv (1996) provou que o uso de 9% de sílica em relação à massa de cimento, reduz a difusividade dos cloretos em 1/5.

### 2.1.6.2 Escória de alto-forno

A escória de alto-forno consiste em um subproduto da fabricação do ferro-gusa em altos-fornos. Deste processo são gerados cerca de 370 kg de escória por tonelada de ferro-gusa. Sua obtenção passa por aplicar à escória líquida em alta temperatura, um resfriamento brusco com água ou uma combinação água-ar, gerando uma solidificação na forma de partículas de dimensão de areia, constituídas basicamente de silicatos e aluminossilicatos de cálcio e magnésio, na forma não cristalina. Esta adico caracteriza-se por apresentar propriedades hidráulicas latentes, uma vez que  constituída dos mesmos óxidos do cimento, mas em proporções diferentes (FERREIRA, 2003).

A principal propriedade da escória de alto-forno que a habilita a ser empregada como adico, é a sua significativa reatividade, que depende da composição química, do teor da fase vítrea e da finura (TAYLOR, 1997; FERREIRA, 2003).

A escória possui um teor de aluminatos superior em relação ao clínquer, sendo que, deste modo, o cimento com escória de alto-forno apresenta capacidade de fixação de cloretos potencialmente superior em relação ao cimento sem adico de escória (BAUER, 1995). Esta fixação, segundo Page et al. (1981), nada mais  do que a formação do cloroaluminato de cálcio hidratado, também conhecido com Sal de Friedel, o qual, ao fixar os cloretos,

contribui para a diminuição da concentração de cloretos livre na solução contida nos poros do concreto.

Primeiramente, pode-se ressaltar que concretos com escória de alto-forno têm a permeabilidade e a porosidade reduzidas e uma crescente resistência ao longo da idade, pois, entre outros fatores, possuem uma microestrutura mais densa (NEVILLE, 1997).

Gastaldini (1996) pesquisando concretos com 50% e 70% de substituição em massa de cimento por escória de alto-forno (área específica de 400 m<sup>2</sup>/kg), verificou decréscimo na resistência à compressão da ordem de 22% a 35%, respectivamente, frente ao concreto de referência aos 28 dias de idade. No entanto, na microestrutura notou-se um aumento no volume dos poros do gel e redução no volume dos poros capilares, ou seja, um refinamento dos poros, além de redução na porosidade total, o que resulta em menor permeabilidade e, conseqüentemente, maior durabilidade do concreto.

SATO (1998), analisando concretos com adição de 70% de escória de alto-forno e os sem adição, ambos com relação água/cimento de 0,44, no que se refere à penetração de cloretos, concluiu que os concretos produzidos com adição obtiveram uma carga passante cerca de 8 vezes menor que a carga passante dos concretos produzidos sem adição, devido à maior fixação dos cloretos e redução do tamanho e da conectividade dos poros.

## **2.2 PRINCIPAIS MECANISMOS DE TRANSPORTE DE MASSA NO CONCRETO**

A seguir são tratados e discutidos os principais mecanismos de transporte de massa no concreto, a saber: permeabilidade (água, ar), absorção capilar, difusão e migração. Estes mecanismos foram selecionados para serem apresentados neste capítulo de revisão da literatura, em virtude de sua importância no contexto da durabilidade e também pelo fato deles terem sido os mecanismos efetivamente considerados na avaliação experimental.

### 2.2.1 Permeabilidade

Permeabilidade é definida como a propriedade na qual um líquido ou gás passa através de um sólido poroso sob um diferencial de pressão. A permeabilidade do concreto é afetada pela conectividade, distribuição e tamanho dos seus poros (NEVILLE, BROOKS, 1997; BASHEER et al., 2001).

Portanto, tem-se que a composição do cimento, relação água/cimento e o grau de hidratação influenciam diretamente na permeabilidade da pasta e, conseqüentemente, na permeabilidade do concreto (HELENE, 1993; FERREIRA, 2003).

Ferreira (2003) ressalta que a permeabilidade a líquidos sob pressão será tanto mais acentuada quanto maior for o diâmetro dos poros capilares, além obviamente da comunicação entre eles; isto na prática é obtido por meio de relações água/cimento relativamente altas (acima de 0,6, por exemplo). Por sua vez, à medida que se reduz a relação  $a/c$ , vai se obtendo estruturas cada vez mais compactas, com poros capilares mais “estreitos”. Isto favorece uma maior absorção capilar, pelas forças de sucção aumentadas quando da redução no diâmetro dos capilares, mas é desejável que aconteça, porque diminui de fato a absorção total e a permeabilidade. A justificativa deste fato é que com estrutura de pasta mais compacta, a despeito do favorecimento no acréscimo das pressões capilares, haverá sempre uma queda significativa na porosidade capilar e na interconexão ou comunicação entre os poros (CASCUDO, 1997).

A lei de Darcy descreve o escoamento da água através de um elemento saturado, de comprimento  $L$ , sob uma pressão  $P$  por um lado e  $P-\Delta P$  pelo outro lado (Figura 2.10). A velocidade de escoamento é calculada pela Equação 2.4.

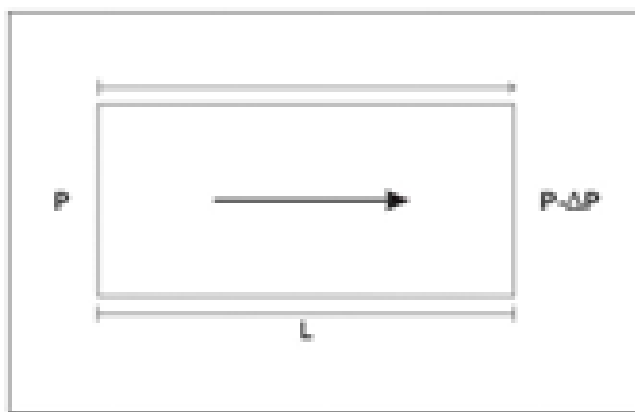


Figura 2.10 – Esquema indicando a direção de fluxo de água em elemento saturado (SATO, 1998).

$$v_1 = -k \frac{\Delta P}{L} = \frac{Q}{S} \quad (2.4)$$

onde:

$v_1$  = velocidade de escoamento da água (m/s);

$k$  = coeficiente de condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade à água do concreto (m/s);

$L$  = dimensão do concreto na direção de escoamento (m);

$\Delta P$  = gradiente de pressão (m.c.a);

$Q$  = vazão de água escoada (m<sup>3</sup>/s);

$S$  = área de superfície confinada por onde percola a água (m<sup>2</sup>).

É importante ressaltar que a aplicação desta lei pressupõe a existência de um fluxo estacionário. Esta condição só se verifica rapidamente se a porosidade do concreto for acentuada, caso contrário o estabelecimento deste estado de fluxo pode demorar algumas semanas (FERREIRA, 2000).

Em concretos de qualidade média ou superior, como é o caso dos concretos de alto desempenho (CAD), é difícil atingir um fluxo estacionário de água. Para este tipo de concretos, a permeabilidade à água pode ser aferida por meio de ensaios, semelhantes aos que recorrem à consideração do fluxo estacionário, operando com pressões menores e medindo a profundidade de penetração da água ou a água absorvida durante o ensaio (AZEVEDO, 2002). Diante disso, Khatri e Sirivivatnanon (1997) propõem um critério de seleção do tipo de ensaio a empregar em concretos (penetração ou fluxo), em função da idade do material na data do ensaio e da resistência à compressão aos 28 dias de idade da forma apresentada nas Equações 2.5 e 2.6.

$$2.3t^2 + 1.1f_{c,28}^2 > 10400 \Rightarrow \text{ensaio de penetração} \quad (2.5)$$

$$2.3t^2 + 1.1f_{c,28}^2 < 10400 \Rightarrow \text{ensaio de fluxo} \quad (2.6)$$

onde:

$t$  = tempo (segundos);

$f_{c,28}$  = resistência à compressão aos 28 dias de idade (MPa).

Considera-se a lei de Darcy, quando o concreto é submetido a um fluxo, por um fluido não compressível, tal como a água. No entanto, quando o fluido é compressível, tal como o oxigênio, a lei de Darcy deve ser modificada para calcular o volume do fluido a determinada pressão média no interior do corpo-de-prova (GRUBE et al, 1984 apud AZEVEDO, 2002). Para tanto, quando se trata de gases, a compressibilidade e a viscosidade devem ser consideradas de modo a determinar o coeficiente de permeabilidade. Desta forma, a permeabilidade ao gás,  $K_G$ , é dada pela Equação 2.7, na qual se aplica a lei de Hagen-Poiseuille, considerando-se um fluxo laminar.

$$K_G = \frac{2QL\eta p_f}{A(p_1^2 + p_2^2)p_2} \quad (2.7)$$

onde:

$K_G$  = permeabilidade ao gás (m<sup>2</sup>/s);

$\eta$  = viscosidade do gás (Ns/m<sup>2</sup>);

$Q$  = volume de gás escoamento (m<sup>3</sup>);

$L$  = espessura da secção atravessada (m);

$A$  = área penetrada (m<sup>2</sup>);

$p_f$  = pressão a que o volume  $Q$  é medido (N/m<sup>2</sup>);

$p_1$  = pressão de entrada do gás (N/m<sup>2</sup>);

$p_2$  = pressão de saída do gás (N/m<sup>2</sup>).

Se a viscosidade do oxigênio a 20°C é de 2.02x10<sup>-16</sup> Ns/m<sup>2</sup>, a Equação 2.8 fica da seguinte forma para calcular a permeabilidade aparente do oxigênio:

$$K_G = \frac{4.04QL10^{-16}}{A(p_1^2 + p_2^2)} \quad (2.8)$$

Segundo Ferreira (2000), o escoamento laminar não é a condição dominante para o transporte de gases através do sistema de poros do cimento hidratado, devido à grande gama de diâmetros de poros. No entanto, isto não quer dizer que a Equação 2.6 não possa ser aplicada para avaliar a permeabilidade ao oxigênio do concreto, pois a lei de Hagen-Poiseuille é aplicada no método de Cembureau prescrito pela RILEM TC-116 (1995), o qual é visto por Nepomuceno (2005) como sendo um método preciso. Segundo Nepomuceno, os concretos avaliados por esse método apresentam valores de permeabilidade entre 10<sup>-14</sup> m<sup>2</sup>/s a 10<sup>-19</sup> m<sup>2</sup>/s.

A permeabilidade do concreto aos gases tem muita sensibilidade quanto à condição de umidade do concreto. Figg (1973) constatou que corpos-de-prova de concreto armazenados em uma temperatura de 20°C e 90% de umidade relativa, tiveram seu tempo de permeabilidade ao ar dez vezes maior do que os corpos-de-prova de mesmo traço armazenados em um ambiente de 20°C e 40% de umidade relativa. Além disso, alguns gases podem reagir com os produtos da hidratação, modificando a estrutura de poros como, por exemplo, o dióxido de carbono que leva à carbonatação da pasta de cimento hidratado (FEITOSA, 2000).

### 2.2.1.1 Principais métodos de ensaio para avaliar a permeabilidade no concreto

### a) Permeabilidade à água

O método de ensaio mais utilizado no Brasil para avaliar a permeabilidade à água do concreto é prescrito pela ABNT NBR 10786:1989, o qual consiste em determinar o coeficiente de permeabilidade à água. Para isso, inicialmente, aplica-se uma pressão de água sobre o corpo-de-prova de maneira controlada e recomendada pela norma; com intuito de registrar a vazão de entrada diariamente no decorrer de 21 dias de ensaio, de tal maneira que possa traçar a curva *tempo x volume acumulado*, a fim de obter a vazão de entrada ao longo do tempo que, por sua vez, dá condições para determinar o coeficiente de permeabilidade à água conforme a lei de Darcy.

Quanto aos critérios de avaliação, tem-se, na Tabela 2.1, os parâmetros prescritos pelo CEB - Comitê Euro – *International du Béton* (CEB-192) para a avaliação do concreto.

Tabela 2.1 – Critérios de avaliação da permeabilidade à água do concreto segundo o CEB-192 (CEB 192).

Permeabilidade (m/s)	Permeabilidade do Concreto	Qualidade do Concreto
$< 10^{-12}$	baixa	boa
$10^{-12}$ a $10^{-10}$	média	média
$> 10^{-10}$	alta	pobre

O ensaio de penetração de água sob pressão é prescrito por meio da norma brasileira ABNT NBR 10787:1994 e conhecido fora do país por meio da ISO 7031, o qual consiste em submeter os corpos-de-prova cúbicos de concreto à água sob pressão numa das faces, em três níveis de pressão, somando um total de 96 horas de ensaio. O resultado do ensaio é a média da maior medida de penetração de água no interior dos corpos-de-prova de concreto, sendo que mais detalhes serão apresentados no subitem 3.5.2.2 do Capítulo 3. Este ensaio é recomendado para concretos de boa qualidade conforme, foi relatado no subitem 2.2.1, e também por ser um ensaio rápido e prático para avaliar a permeabilidade do concreto.

Segundo Neville (1997), um concreto no qual se obtém uma medida de penetração inferior a 50 mm é classificado como sendo “impermeável”, e uma medida de penetração inferior a 30 mm é classificado como sendo “impermeável em condições agressivas”.

Com relação aos ensaios que avaliam a permeabilidade à água na camada superficial do concreto, tais como, o *in surface absorption test* (ISAT) e o de Figg, considerados ensaios *in situ*, são de certo modo influenciados pelo mecanismo de absorção capilar, uma vez que é praticamente nula a pressão da água.

O ensaio ISAT foi desenvolvido por Levitt e vem descrito na norma inglesa BS 1881 (1970), o qual consiste em determinar a quantidade de água absorvida por meio do deslocamento da água em um tubo capilar. O fluxo que se estabelece é medido em vários intervalos de tempo, a fim de obter a velocidade inicial de absorção superficial expresso em centímetros cúbicos por metro quadrado por segundo (FERREIRA, 2000).

No ensaio de Figg para avaliar a permeabilidade à água, normalizado pela LNEC E413 (1993), o sistema de preparação do furo é semelhante quando se quer avaliar a permeabilidade ao ar, e consiste em avaliar o tempo que leva o concreto para absorver 0,01 cm<sup>3</sup> de água. Em seguida, calcula-se a velocidade de absorção da água, conforme a Equação 2.9.

$$WAR = \frac{t_2}{10} \cdot 10^3 \quad (2.9)$$

onde:

$WAR$  = coeficiente de permeabilidade à água (s/cm<sup>3</sup>); e

$t_2$  = tempo necessário para o concreto absorver 0,01 cm<sup>3</sup> de água.

## **b) Permeabilidade aos gases**

Entre os principais métodos de permeabilidade aos gases, os mais conhecidos e utilizados são: método Cembureau, método de Figg, método de Parrott, e o método de Torrent.

O método de Cembureau é dito como laboratorial e descrito tanto pela RILEM TC-116 (1995) quanto pela LNEC E392 (1993). Ele consiste basicamente em fazer atravessar o corpo-de-prova por oxigênio a uma pressão variável de 1,5 bar até 3,0 bar, medindo-se por meio do caldalímetro de bolha o volume de oxigênio que passa pelo corpo-de-prova, conforme ilustra a Figura 2.11, sendo regido pela lei de Hagen-Poiseuille.

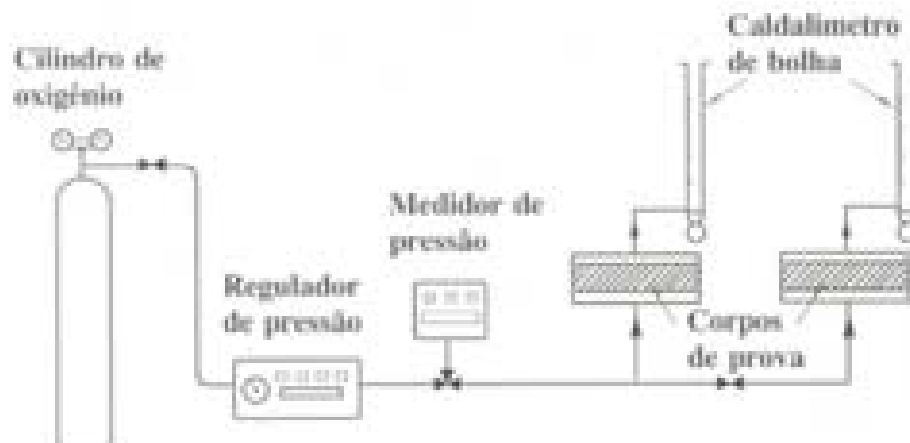


Figura 2.11 – Esquema do equipamento para medir permeabilidade ao oxigênio (KOLLER, 1989 *apud* NEPOMUCENO, 2005).

Os demais métodos, tais como o método de Figg, método de Parrott e o método de Torrent, são considerados ensaios *in situ*, os quais consideram o ar como fluido.

O método de Figg (FIGG, 1973) consiste em fazer um furo de 5,5 mm de diâmetro por 30 mm de profundidade na superfície do concreto. Os 20 mm superficiais são vedados com borracha e silicone, de forma a produzir uma câmara no interior do concreto, sendo aperfeiçoado, mais tarde, por Figg e outros (CATHER et al., 1984), os quais sugeriram um diâmetro de furo de 10 mm por 40 mm de profundidade mantendo a vedação no decorrer do furo de 20 mm, denotando que com essas dimensões de furo, as variações dos resultados entre os furos de um mesmo corpo-de-prova, reduziria tanto para o ensaio de permeabilidade ao ar quanto ao ensaio de permeabilidade a água.

É importante salientar que o método de Figg para avaliar a permeabilidade ao ar é também prescrito pela norma LNEC E413 (1993). O princípio do método é a medida do tempo que o ar leva para penetrar através do cobrimento do concreto e diminuir o vácuo imposto na cavidade de -55 KPa a -50 KPa. Como alternativa, a norma sugere o cálculo do coeficiente de permeabilidade ao ar, designado por AER (velocidade de exclusão do ar), por meio da Equação 2.10 e esquematizado na Figura 2.12.

$$AER = \frac{t_1}{\left[ \frac{55}{50} - V \right] \cdot \frac{52.5}{100}} \quad (2.10)$$

onde:

$AER$  = coeficiente de permeabilidade ao ar (s/cm<sup>3</sup>);

$V$  = volume do equipamento, incluindo o volume do furo do ensaio (cm<sup>3</sup>);

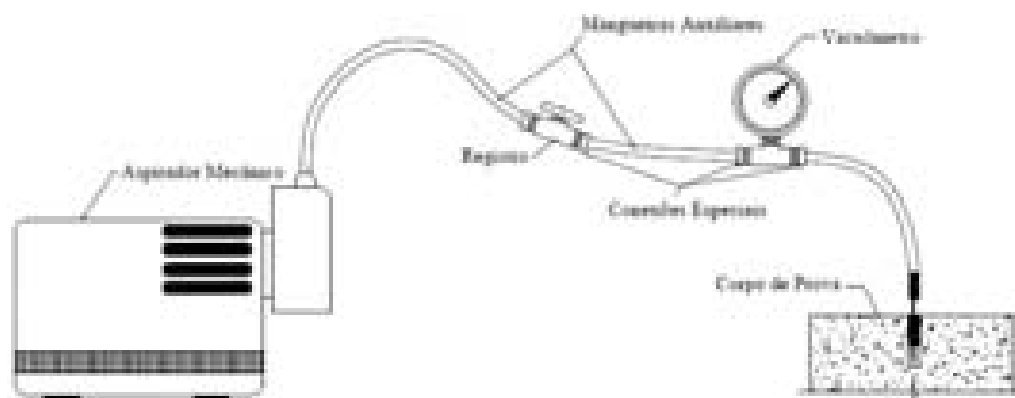


Figura 2.12 – Esquema básico do Método de Figg (LEÃO *et al.*, 2001).

Cather *et al.* (1984) propôs uma classificação para concretos quanto à permeabilidade ao ar (método de Figg), como mostra na Tabela 2.2. No entanto, recomenda-se que essa classificação não seja determinante, ou seja, é importante ter respaldo de outros ensaios como, por exemplo: esclerometria, carbonatação, ultra-som, penetrabilidade de cloretos, absorção capilar, entre outros.

Tabela 2.2 – Classificação do tipo de material cimentício em função do tempo de permeabilidade (CATHER *et al.*, 1984).

Categoria	Tempo de Permeabilidade (s)	Interpretação	Tipo de Material
0	<30	pobre	argamassa porosa
1	30-100	moderada	concreto ~ 20 MPa
2	100-300	boa	concreto 30-50MPa
3	300-1000	ótima	Concreto bem adensado e bem curado
4	>1000	excelente	concreto modificado

O método de Parrott se assemelha ao método de Figg. O ensaio é realizado após a abertura de um furo de 20 mm de diâmetro e 35 mm de profundidade, selada com uma bucha expansiva, devendo antes verificar a umidade, do concreto, pois sabe-se que a umidade afeta muito o resultado de permeabilidade ao ar. A peculiaridade deste ensaio é aplicar uma sobrepressão no furo, em vez de se criar o vácuo, medindo o tempo necessário para a pressão cair de 0,6 bar a 0,4 bar, ou lendo-se em alternativa a pressão ao fim de 5 minutos, no caso de concretos mais impermeáveis (FERREIRA, 2000). Em geral, o coeficiente de permeabilidade é calculado por meio da Equação 2.11.

$$K_G = \frac{c}{t} \cdot \frac{(p_1 - p_2)}{(p_1 + p_2)} \quad (2.11)$$

onde:

$C$  = constante dependente do volume do ar comprimido ( $252 \times 10^{-16}$  para o equipamento corrente);

$t$  = tempo (s);

$p_1$  = pressão inicial (N/m<sup>2</sup>);

$p_2$  = pressão final (N/m<sup>2</sup>).

No método proposto por Torrent existem duas câmaras de vácuo, de modo a evitar que o ar que passa através da superfície do concreto possa interferir no resultado do ensaio. Obtém-se, assim, um fluxo unidirecional na câmara interior, tornando mais fácil o cálculo do coeficiente de permeabilidade. Além disso, se faz a correção da umidade medindo a resistividade (FERREIRA, 2000; NEPOMUCENO, 2005). Na Figura 2.13 detalhe do equipamento proposto por Torrent.

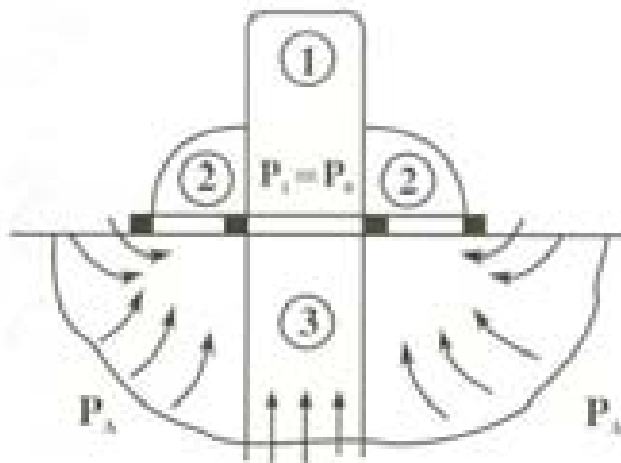


Figura 2.13 – Esquema do equipamento proposto por Torrent (1999), para ensaio de permeabilidade ao ar (NEPOMUCENO, 2005).

### 2.2.2 Absorção capilar

Absorção capilar é o transporte de líquidos nos poros devido à tensão superficial agindo nos capilares. Ela está relacionada não só com a estrutura dos poros, mas também com as características do líquido, tais como viscosidade, densidade e tensão superficial, e também das características do sólido poroso como raio, tortuosidade e a continuidade dos poros, além da energia superficial (BAUER, 1995; LARA, 2003).

Quanto mais elevada for a tensão superficial no interior dos poros maior será a ascensão capilar, e quando os líquidos são altamente viscosos torna-se maior a dificuldade de penetração destes nos poros do concreto (CASCUDO, 1997). Dentro de um poro capilar a pressão de vapor sobre o líquido é menor do que a pressão de saturação, causando então a evaporação da água no interior do poro e, devido à diferença de pressão, surge o menisco, como se vê na Figura 2.14.

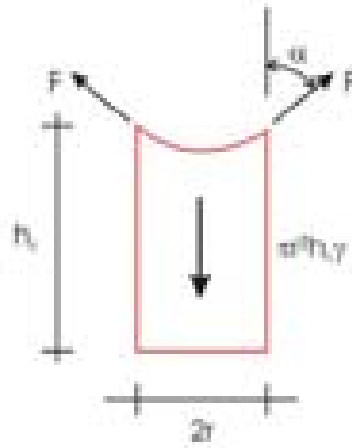


Figura 2.14 – Representação esquemática das forças que atuam num líquido dentro de um capilar (FERREIRA, 2003).

Na Figura 2.14 é mostrado um líquido que ascende à altura  $h_c$  num capilar de raio aberto para a pressão atmosférica no topo. A força que mantém a ascensão do líquido é a componente vertical da força  $F$ , ou seja,  $F \cdot \cos \alpha$ . Sendo o comprimento do anel de contato igual a  $2\pi r$ ,  $F = 2\pi r T_s$  e a componente vertical de  $F$  igual a  $2\pi r T_s \cos \alpha$ , onde  $T_s$  é a tensão superficial do líquido. O volume do líquido no capilar é  $\pi r^2 h_c$ .

Fazendo a força resultante para cima igual ao peso, tem-se:

$$2\pi T_s \cos \alpha = \pi r^2 h_c \gamma_w$$

Considerando  $\alpha = 0$  (menisco semi-esférico), tem-se:

$$h_c = \frac{2T_s}{\gamma_w r} \quad (2.11)$$

onde:

$h_c$  = altura de sucção (mm);

$T_s$  = tensão superficial do líquido (g/mm);

$\gamma_w$  = densidade do líquido (g/mm<sup>3</sup>);

$r$  = raio do capilar (mm).

Se cada poro capilar do concreto for individualizado é possível aplicar as leis de Jurin (Equação 2.11) e Poiseuille (Equação 2.12) (AZEVEDO, 2002).

$$v = \frac{r^2 \rho}{8\eta h_c} \quad (2.12)$$

onde:

$v$  = velocidade de ascensão capilar (mm/s);

$\rho$  = pressão de ascensão capilar (g/mm<sup>2</sup>);

$\eta$  = viscosidade do líquido (g.s/mm<sup>2</sup>);

$r$  = raio do capilar (mm);

$h_c$  = altura de sucção (mm)

Como  $v = h_c/t$ , sendo  $t$  o tempo de sucção capilar em segundos, e para a água  $T_s = 75 \times 10^{-4}$  g/mm e  $\eta = 13 \times 10^{-8}$  g.s/mm<sup>2</sup>, obtém-se a Equação 2.13.

$$h_c \cong 120\sqrt{tr} \quad (2.13)$$

onde:

$h_c$  = altura de sucção (mm);

$t$  = tempo (s);

$r$  = raio do capilar (mm).

Portanto, é possível demonstrar que a sucção capilar é proporcional à raiz quadrada do tempo e do raio capilar. Cabe ressaltar, que na prática, não é possível analisar os poros capilares individualmente pelo fato de estes estarem dispostos de uma forma irregular e formarem um emaranhado de pequenos canais, de secção extraordinariamente variável, extremamente complexos e numerosos (AZEVEDO, 2002).

A microestrutura porosa tem influência determinante na absorção capilar, quer seja no volume de água absorvido, na velocidade de absorção, como também na altura de sucção. Em princípio, quanto menor for o diâmetro dos capilares, maiores as pressões capilares e, conseqüentemente, maior e mais rápida absorção de água (LARA, 2003).

Segundo Ferreira (2003), quanto menores os diâmetros dos poros, maiores as pressões capilares e maior a altura ( $h_c$ ). Sob enfoque inverso, com poros maiores tem-se alturas menores, porém volumes absorvidos maiores. No entanto, segundo Basheer *et al.* (2001), concretos de reduzida relação água/cimento, apesar de apresentarem capilares com diâmetros menores, estes poros são muito menos interconectados, resultando em menores alturas de sucção e também em menores volumes totais absorvidos.

É importante salientar que a absorção capilar só pode ocorrer em concretos não saturados e, por isso, é o principal mecanismo de penetração de cloretos no concreto quando a estrutura está submetida a ciclos de molhagem e secagem. No período de molhagem, a superfície absorve a solução de cloreto rapidamente e no período de secagem a água evapora e o sal se mantém no concreto. Com os ciclos subseqüentes há o aumento da

concentração de cloretos na solução dos poros do concreto e, conforme a umidade relativa do ambiente, o sal reduz a evaporação, aumentando a umidade no interior do concreto (KROPP, 1995).

Stanish (2000 *apud* SANTOS, 2006) afirma que absorção capilar não é por si só suficiente para transportar os cloretos ao nível da armadura do concreto, exceto nos casos onde o concreto utilizado seja de qualidade extremamente baixa e o cobrimento seja pequeno. No entanto, a absorção capilar pode transportar mais rapidamente os cloretos até determinadas profundidades e reduzir a distância que eles têm que penetrar por difusão para alcançar a armadura. A Figura 2.15 ilustra bem qual é a interferência do mecanismo de absorção capilar no transporte de íons, em profundidade, na camada superficial do concreto.

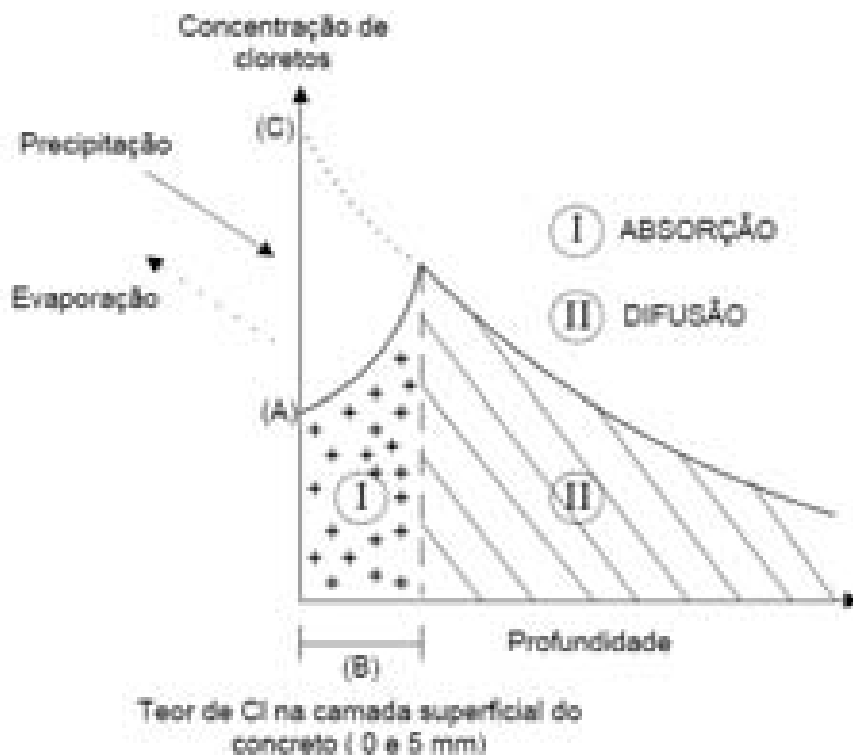


Figura 2.15 – Formas de penetração de cloretos em concreto (Adaptado de BORGES *et al.* *apud* ANDRADE, 2001).

### 2.2.2.1 Ensaio para avaliar absorção capilar

Para entender qualquer ensaio de absorção por capilaridade, antes é preciso entender a cinética da absorção capilar. Na Figura 2.16 apresenta um resultado típico de um ensaio de absorção capilar, expresso num diagrama que relaciona a água absorvida por unidade de área com a raiz quadrada do tempo. Neste diagrama notam-se três comportamentos distintos no decorrer do ensaio.

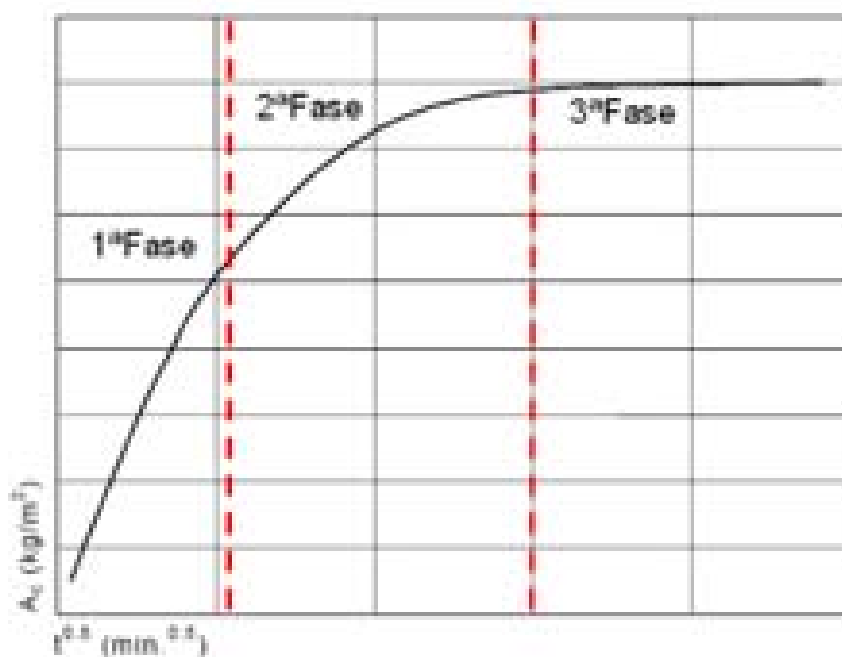


Figura 2.16 – Cinética de absorção capilar (Adaptado de AZEVEDO, 2002).

Na primeira fase, correspondente à maior inclinação e que permite o cálculo do coeficiente de absorção capilar, expresso em  $\text{mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min}^{1/2})$  ou  $\text{mm}/\text{min}^{1/2}$ , nota-se o preenchimento com água dos capilares de maior diâmetro. A segunda parte da curva reflete o preenchimento dos capilares mais finos e processa-se mais lentamente. A terceira e última fase, caracteriza-se por uma estabilização da quantidade de água absorvida, fator indicativo do completo preenchimento da rede capilar (AZEVEDO, 2002).

No Brasil e outros países, o ensaio de absorção capilar consiste basicamente em determinar o diagrama descrito na Figura 2.16. O método brasileiro é prescrito pela ABNT NBR 9779:1994, o qual consiste em determinar a absorção de água por capilaridade, submetendo uma das faces do corpo-de-prova à água e medindo a massa nos períodos de 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h. Mais detalhes deste ensaio estão descritos no subitem 3.5.2.1, do próximo capítulo.

Segundo Azevedo (2002), algumas entidades propõem um ensaio mais rápido que o método tradicional para obtenção da absorção capilar, como o método da *Concrete Society*, de 1987, que sugere um ensaio de 4 horas, sendo a absorção de água medida aos 5 min, 10 min, 20 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min, 180 min e 270 min, classificando o concreto qualitativamente em função do coeficiente de absorção capilar, conforme a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Classes de qualidade do concreto em função do seu coeficiente de absorção capilar (BROWNE, 1991 *apud* AZÉVEDO, 2002).

Coeficiente de absorção capilar (S)	Classe de qualidade
$S \geq 0.2 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min}^{1/2})$	Reduzida
$0.1 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min}^{1/2}) < S < 0.2 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min}^{1/2})$	Média
$S \leq 0.1 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min}^{1/2})$	Elevada

### 2.2.3 Difusão iônica

A difusão é o movimento de íons ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , entre outros) ou moléculas ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ , entre outros) devido a um gradiente de concentração, onde estes íons ou moléculas difundem de regiões de maior para regiões de menor concentração. Neste item serão discutidos aspectos da difusão iônica, principalmente de cloretos, por ser este mecanismo abordado na parte experimental desta dissertação.

Para que ocorra a difusão iônica é necessário que o concreto contenha certo teor de umidade mínimo que permita a movimentação do íon. Ao contrário do caso de gases onde conteúdos elevados de umidade bloqueiam a sua entrada por difusão. Assim, quando os íons encontram em seu caminho uma região seca, a difusão é interrompida. Por isso, os maiores coeficientes de difusão são encontrados quando o concreto está saturado e seu valor decresce com a umidade (KROPP, 1995).

A difusividade de cloretos depende da estrutura porosa do concreto, da temperatura, da umidade relativa, das interações eletrostáticas entre íons e as paredes dos poros e também do consumo e composição química do cimento (HELENE, 1993; SATO, 1998; HOFFMANN, 2001). Salta (1999) salienta que a quantidade e a forma dos poros no concreto, a cura e o grau de hidratação do concreto influenciam fortemente no coeficiente de difusão. Quando se considera o período de iniciação, segundo Tuutti (1970 *apud* HOFFMANN, 2001), o mecanismo de difusão depende dos seguintes parâmetros:

- Concentração diferencial de cloretos entre o ambiente e o concreto;
- Distância de transporte que depende da espessura de cobrimento;
- Permeabilidade do concreto contra cloretos;
- Capacidade do concreto de fixar cloretos (conteúdo de álcalis do cimento);
- Concentração de cloretos na superfície do concreto.

De acordo com Halamickova e Detwiler (1995) e Salta (1999) o tipo, quantidade e porosidade do agregado pode também interferir na difusão, uma vez que a existência do

agregado aumenta o número de poros capilares na zona de transição (interface pasta/agregado).

O mecanismo de difusão de íons é modelado por meio de duas leis propostas por Fick. A primeira lei de Fick é definida considerando que o fluxo de uma substância através de um meio é diretamente proporcional ao produto da difusividade pelo gradiente de concentração, medido na direção perpendicular à seção do fluxo, conforme apresentada na Equação 2.14.

$$J = -D_{ef} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.14)$$

onde:

$J$  = fluxo iônico (Kg/m<sup>2</sup>s);

$D_{ef}$  = coeficiente de difusão efetiva (m<sup>2</sup>/s);

$\frac{\partial C}{\partial x}$  = gradiente de concentração na direção do fluxo (mol/m<sup>4</sup>);

O sinal negativo indica que o fluxo ocorre no sentido oposto ao aumento da concentração (PEREIRA, 2001). Esta equação se aplica para fenômenos de difusão em estado estacionário, ou seja, a concentração da espécie estudada em um volume infinitesimal de concreto não varia com o tempo. Quando se tem um estado não estacionário, que contempla o fluxo variável com o tempo e a profundidade de penetração, recorre-se à segunda lei de Fick, definida de acordo com Equação 2.15.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.15)$$

onde:

$D_a$  = coeficiente de difusão aparente(m<sup>2</sup>/s);

$C$  = concentração (Kmol/m<sup>3</sup>);

$x$  = distância a partir de um ponto de origem considerado (m);

$t$  = tempo (s).

A solução da equação anterior pode ser encontrada detalhadamente no trabalho de Liang *et al.* (1999), citado por Andrade (2001), onde emprega-se a transformada de Laplace, admitindo-se as condições de contorno explicitadas pelas Equações 2.16 e 2.17.

$$C(x,0) = 0 \rightarrow t = 0 \quad (2.16)$$

$$C(0,t) = C_s \rightarrow x = 0 \quad (2.17)$$

Com isso, a forma final para a solução da Equação 2.13, admitindo as condições de contorno apresentadas, é a Equação 2.18:

$$C(x, t) = C_i + (C_s - C_i) \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \quad (2.18)$$

onde:

$C(x, t)$  = concentração de cloretos no concreto a uma distância  $x$  da superfície de exposição em um tempo  $t$  (%);

$C_i$  = concentração inicial de cloretos no concreto (%);

$C_s$  = concentração de cloretos (constante) na superfície do concreto (%);

$x$  = distância à partir da superfície de exposição aos cloretos;

$t$  = tempo de exposição (anos);

$D_a$  = coeficiente de difusão de cloretos (constante) ( $\text{cm}^2/\text{ano}$ );

$\operatorname{erfc}(z)$  = função complementar de erro de Gauss.

Com a segunda lei de Fick é possível estimar a vida útil de um elemento de concreto armado conhecendo-se parâmetros como  $C$ ,  $C_i$ ,  $C_s$  e  $D_a$ . Existem outras formulações mais recentes para se modelar a penetração de agentes agressivos para o interior do concreto, mas a segunda lei de Fick é utilizada em função da sua extrema simplicidade de resolução matemática e devido a sua consagração, quando comparada às demais formulações propostas, que ainda necessitam de validações mais consistentes (CABRAL, 2000; PEREIRA, 2001).

Por último, é importante salientar que as leis de Fick de difusão são adequadas apenas para estudar a difusão de sistemas em que não haja interação iônica (AZEVEDO, 2002). No caso de existência dessas interações iônicas, mesmo que em soluções com reduzidas concentrações, verifica-se uma redução do potencial químico e das forças de transporte das espécies em difusão, tornando o coeficiente de difusão dependente da concentração (SALTA; GONÇALVES, 1996).

## 2.2.4 Migração

A migração é o fenômeno de movimentação de espécies iônicas em que a força motriz é uma diferença de potencial. Esta diferença de potencial é, normalmente, originada pela presença de dois eletrodos, um positivo e um negativo, de forma que os íons se dirigem ao eletrodo com carga de sinal oposto. Assim, a movimentação iônica por migração pode permitir o fluxo de íons de regiões de maior concentração para regiões de menor concentração, obedecendo ao mesmo sentido do fluxo de difusão (KROPP, 1995).

Segundo Ferreira (2000), migração consiste no transporte de íons num eletrólito devido à ação de um campo elétrico. A aplicação do campo elétrico acelera o mecanismo de difusão dos íons, de maneira que os íons positivos deslocarão preferencialmente para o eletrodo

negativo e íons negativos para o eletrodo positivo. Além disso, ele ressalta que é questionável se o desempenho a longo prazo pode ser previsto com base em resultados de experiências de curta duração. Possivelmente, essas experiências poderão apenas ajudar a quantificar diferenças entre os concretos, em vez de prever com precisão o desempenho do concreto.

Partindo da lei geral que governa a transferência da massa em eletrólitos dada pela equação de Nernst-Planck, composta por três termos (apresentada pela Equação 2.19), pode-se obter apenas o termo referente à migração para representar tal mecanismo, somente quando se considera que a convecção não seja relevante nos poros do concreto e que a difusão possa ser desprezada quando se tem um elevado valor da voltagem aplicada. Diante disso, o coeficiente de difusão efetivo pode ser calculado em condições de estado estacionário pela Equação 2.20, em regime de migração, desconsiderando os efeitos de combinação de cloretos (TANG, 1996).

#### **Fluxo = difusão + migração+convecção**

$$J = -D_{ef} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{zF}{RT} D_{ef} C \frac{\partial E}{\partial x} + CV_e \quad (2.19)$$

$$J = \frac{zF}{RT} D_{ef} C \frac{\partial E}{\partial x}$$

$$D_{ef} = \frac{JRT}{zFC} \cdot \frac{L}{E} \quad (2.20)$$

onde:

$J$  = fluxo de massa (g/m<sup>2</sup>s);

$D_{ef}$  = coeficiente de difusão(efetivo) segundo a primeira lei de Fick (m<sup>2</sup>/s);

$C$  = concentração (g/m<sup>3</sup>);

$x$  = distância (x);

$Z$  = carga elétrica;.

$R$  = constante dos gases (J/mol.K);

$T$  = temperatura absoluta (K);

$E$  = potencial elétrico (V);

$V_e$  = velocidade do eletrólito (m/s).

Em condições de estado estacionário, o perfil de concentração dos cloretos pode ser considerado constante e igual à concentração dos cloretos à superfície do concreto. No entanto, na prática, verifica-se que o perfil é como se apresenta na Figura 2.17, na qual se observa um declive variável no tempo, devido à contribuição da difusão que depende do gradiente do potencial e do coeficiente de difusão (TANG, NILSSON, 1992; TANG, 1996; SALTA, 1999).

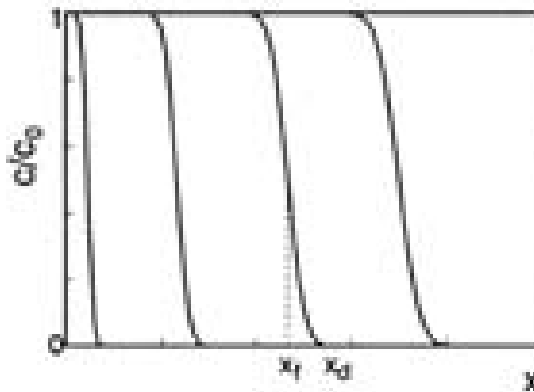


Figura 2.17 – Perfil teórico considerando a contribuição da difusão (TANG, NILSSOM, 1992).

Diante disso, Salta (1999) afirma que há uma relação entre os mecanismos de difusão e migração, expressa pela equação de Einstein, conforme apresentada na Equação 2.21, a qual define a mobilidade do íon expressa normalmente em  $\text{cm}^2/\text{sV}$ .

$$u = \frac{zFD_{ef}}{RT} \quad (2.21)$$

onde:

$u$  = é a mobilidade do íon ( $\text{m}^2/\text{sV}$ );

$D_{ef}$  = coeficiente de difusão (efetivo) segundo a primeira lei de Fick ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$x$  = distância ( $x$ );

$Z$  = carga elétrica;

$R$  = constante dos gases ( $\text{J}/\text{mol.K}$ );

$T$  = temperatura absoluta ( $\text{K}$ ).

Com a definição de mobilidade iônica,  $u_j$ , como velocidade limite de um íon submetido a um campo elétrico unitário, foi possível definir um novo parâmetro,  $D_{mig}$ , apresentado na Equação 2.22, que nada mais é do que a resolução da equação de Nernst-Plank em analogia com o mecanismo de transporte por difusão em condições não estacionárias, tal como fez Andrade (1993). Em que  $zFE/RT$  é o fator de aceleração do transporte por difusão dos íons pelo campo elétrico.

$$D_{mig} = uE = \frac{zF}{RT} D_{ef} E \quad (2.22)$$

onde:

$u$  = é a mobilidade do íon ( $\text{m}^2/\text{sV}$ );

$D_{mig}$  = coeficiente de migração ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$D_{ef}$  = coeficiente de difusão (efetivo) segundo a primeira lei de Fick ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$x$  = distância ( $x$ );

$Z$  = carga elétrica;

$R$  = constante dos gases ( $\text{J}/\text{mol.K}$ );

$T$  = temperatura absoluta ( $\text{K}$ ).

Diante da definição apresentada na Equação 2.22, segundo Andrade (1993), pode-se substituir  $D_{mig}$  pelo coeficiente de difusão  $D_{dif}$  obtido em condições não estacionárias por meio da 2ª lei de Fick, como se observa na Equação 2.23, a qual tem as suas incógnitas com os mesmos significados das equações anteriores.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{mig} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{zF}{RT} D_{dif} E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.23)$$

Considerando um espaço semi-infinito, tem-se a Equação 2.24 proposta por Tang e Nilsson (1992) que é muito conhecida, a qual faz uma relação de  $x_f$  e  $x_d$ , dando condições para a determinação do coeficiente de difusão por meio de um ensaio de migração em estado não estacionário, de maneira rápida e simples.

### 2.2.5 Aspectos gerais de alguns métodos para a previsão do ingresso de cloretos no concreto por migração ou difusão

O coeficiente de difusão ou difusividade é o índice que mede a habilidade do concreto em resistir à penetração de cloretos, sendo, portanto um parâmetro muito importante para prever a durabilidade do concreto. Para se obter este índice, há vários métodos de avaliação em diferentes regimes (estacionário, não estacionário) conforme mostra a Tabela 2.4.

Segundo Geiker *et al.* (1995), citado por Calçada (2004), é possível classificar os métodos de ensaio atualmente disponível em três categorias:

- Difusão em condição estacionária;
- Difusão em condição não estacionária;
- Métodos elétricos.

Tabela 2.4 – Métodos para determinação dos coeficientes de difusão de cloretos (Adaptado de SALTA, 1999; FERREIRA, 2000).

Difusão	Regime não estacionário	Ensaio
	(2ª lei de Fick) (por imersão)	Ensaio acelerado (LNEC E390, APM 302; AASHTO T 259)
Difusão	Regime estacionário	Células de difusão: células de Page (LNEC E383; PAGE <i>et al.</i> , 1981; BUENFELD, 1987; CONCRETE SOCIETY, 1987; BIGAS, 1994; Costa, 1997)
	(1ª lei de Fick) (células)	Células de difusão com agitação
Migração	Regime não estacionário <i>Ensaio rápido de Penetrabilidade de cloretos</i>	Whiting (1993); AASHTO T277; ASTM C1202:2009: mede-se a carga elétrica Q após 6 horas sob o potencial de 60 V.
		Dhir <i>et al.</i> (1990); ensaio em que se obtém D
		Bercke e Hicks (1992): ensaio em que sob um potencial de 30 V se define o perfil e a partir deste calcula-se D.
		CTH: Tang e Nilsson (1992); ensaio em que sob um potencial de 30 V se define o perfil e a partir deste calcula-se D.
		Andrade e Whiting (1996): ensaio com a duração de 48 horas em que sob um potencial de 12 V se define o perfil.
		Streicher e Alexander (1995): ensaio semelhante ao AASHTO T277 e ASTM C 1202:2009, mas muito mais rápido, mede-se a condutividade inicial do concreto.
	Regime estacionário	Ensaio nórdico: Nordtest method, 1989
	Andrade (1993): ensaio baseado na equação de Nernst Planck	

A seguir, são resumidas alguns métodos de ensaio separados de acordo com as categorias definidas por Geiker *et al.* (1995).

### 2.2.5.1 Métodos de difusão em condição estacionária

O método mais conhecido e divulgado baseia-se na utilização das “células de difusão”, as quais começaram a ser utilizadas por Page *et al.* (1981). A Figura 2.18 apresenta o arranjo de uma célula de difusão. Este método consiste em submeter uma fatia fina de corpo-de-prova, em geral, pasta ou argamassa, a uma diferença de concentração. A amostra é posicionada entre dois reservatórios, um contendo uma solução iônica em estudo (reservatório 1, por exemplo, cloretos), e a outra contendo uma solução livre de tais íons (reservatório 2). Com decorrer do tempo é feito o monitoramento da concentração de cloreto na célula que não os continha inicialmente até um determinado momento, quando se constata uma taxa de ingresso de cloretos constante, o que indica que o fluxo está em condição estacionária. A partir daí considera-se que primeira lei de Fick é válida, sendo possível calcular o coeficiente efetivo de difusão, o qual é obtido por meio da equação detalhada por Page *et al.* (1981).

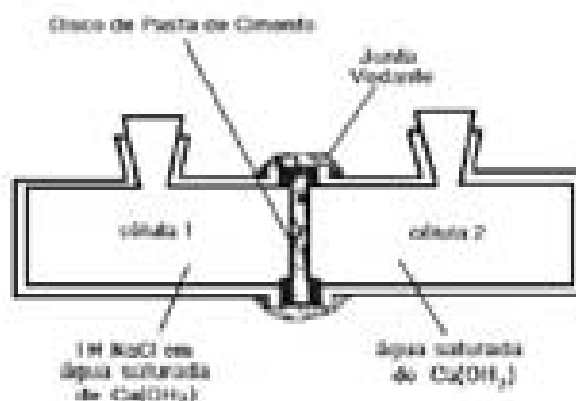


Figura 2.18 – Arranjo da célula de difusão (PAGE *et al.*, 1981).

Segundo Calçada (2004), uma das grandes desvantagens deste método de ensaio é a demora até que a condição de fluxo estacionário seja atingida, podendo levar meses, dependendo da espessura da fatia e das propriedades do material. Além disso, o método não é muito aplicável para o concreto, já que as fatias muito finas não seriam representativas de todo o material e fatias muito espessas tenderiam a aumentar ainda mais o tempo de ensaio.

Diante do inconveniente da demora de se obter a condição de regime estacionário, Cabrera e Hassan (1997 *apud* CALÇADA 2004) propuseram que os corpos-de-prova fossem saturados com soluções de cloretos. Com isso, obtém-se uma redução significativa do tempo necessário para que a condição de fluxo estacionário seja atingida. Por outro lado, alguns autores alertam que a secagem dos corpos-de-prova em estufa para posterior saturação poderia induzir a microfissuração do concreto falseando os resultados de coeficientes de difusão (CALÇADA, 2004).

### 2.2.5.2 Métodos de difusão em condição não estacionária

Os métodos mais comuns para determinar a difusão de cloretos no concreto baseiam-se na imersão de corpos-de-prova (cp's) de concreto em uma solução salina, os quais são submetidos à penetração de cloretos por um certo período de tempo. Posteriormente, os cp's são fatiados ao longo da direção de penetração dos cloretos, e cada fatia tem o seu teor de cloretos determinado, podendo ser traçado o perfil de cloretos do concreto estudado. A partir daí, ajusta-se a solução da segunda lei de Fick ao perfil de cloretos medido e obtém-se um coeficiente de difusão aparente. O teor de cloretos é quantificado por meio de extração de amostras em pó e sua subsequente análise química. Esta não é a única maneira de determinar a difusividade de cloretos por meio de ensaios de imersão. Pode-se

determinar também com auxílio da medida da profundidade de penetração de cloretos pelo do método colorimétrico, que é mais prático.

O método colorimétrico consiste da aplicação de uma solução de nitrato de prata, a qual, quando aspergida na superfície do concreto, dá início a uma reação fotoquímica com alguns constituintes da pasta de cimento, catalisada pela luz. Havendo a presença de cloretos livres, ocorre a formação de precipitados brancos de cloreto de prata; no caso de os cloretos estarem presentes na forma combinada, há a formação de precipitados escuros de óxido de prata. Pela análise dos pontos brancos ou escuros, pode-se inferir sobre eventual presença de alguma forma de cloreto presente na amostra avaliada (JUCÁ, 2002; CASCU DO, 2005). Portanto, obtendo-se a medida de profundidade de cloretos referente aos cloretos livres, é possível determinar a difusividade dos cloretos por meio da Equação 2.24, proposta por Collepar di et al. (1970), a qual é regida pela segunda lei de Fick, onde se considera constantes a concentração de cloreto dada pela posição  $x_d$  e a concentração de cloretos na superfície (CALÇADA, 2004).

$$x_d = k\sqrt{D \cdot t} \quad (2.24)$$

onde:

$x_d$  = profundidade de penetração de cloretos;

$k$  = constante;

$D$  = coeficiente de difusão;

$t$  = tempo de exposição.

O ensaio de imersão é prescrito pela AASHTO T-259, de 1980, e é realizado com vigas de dimensões 300 mm x 300 mm x 750mm, em solução 3% de cloreto de sódio. As vigas são submetidas a imersão durante 90 dias, sendo determinado o perfil de cloretos por meio do método colorimétrico (solução de nitrato de prata). Pode-se também realizar este ensaio utilizando a norma portuguesa LNEC E 390 (1993).

De acordo com Ferreira (2000), uma das desvantagens do ensaio de imersão é a sua grande duração. Com isso, na tentativa de reduzir o tempo de ensaio pode-se utilizar uma concentração elevada. No entanto, deve-se ter atenção quanto a interação iônica, pois a lei de Fick pode deixar de ser válida.

### 2.2.5.3 Métodos Elétricos

Para se obter de maneira ágil uma previsão de vida útil de estruturas de concreto armado, surgiram métodos para acelerar o ingresso de cloretos no concreto por meio da aplicação de um campo elétrico. Este fenômeno é conhecido como migração, a aplicação de uma

diferença de potencial faz com que os cloretos migrem do corpo-de-prova em direção ao pólo positivo. Com base nesse comportamento, muitos autores tentam, a partir de métodos de migração, correlacionar os resultados com métodos ditos como de difusão. Além disso, a maioria dos autores nomeia os coeficientes obtidos por meio do mecanismo de migração como sendo coeficientes de difusão. Diante disso, é importante ficar atento em qual mecanismo foi obtido o coeficiente e em que regime (estacionário ou não estacionário) foi submetido. Nos itens a seguir, são descritos os principais métodos elétricos conhecidos.

### a) Ensaio de penetrabilidade de cloretos

Este método de ensaio, conhecido principalmente pela ASTM C1202 : 2009 foi proposto inicialmente por Whiting (1981), cujo o arranjo do ensaio encontra-se representado na Figura 2.19. Neste ensaio, um disco de concreto de 5 cm de espessura e aproximadamente 10 cm de diâmetro, é disposto entre duas células com soluções diferentes. Uma das células contém cloreto de sódio a 3% e na outra uma solução de hidróxido de sódio 0,1 M submetida a uma diferença de potencial de 60 V.

A duração do ensaio é de 6 horas e a cada 30 minutos é lida a corrente passante no corpo-de-prova. A integral da curva corrente *versus* tempo permite calcular a carga total passante. De acordo com este resultado, é possível classificar qualitativamente o concreto quanto a sua durabilidade, conforme é mostrado na Tabela 2.5. Mais detalhes deste ensaio encontram-se no subitem 3.5.2.4.

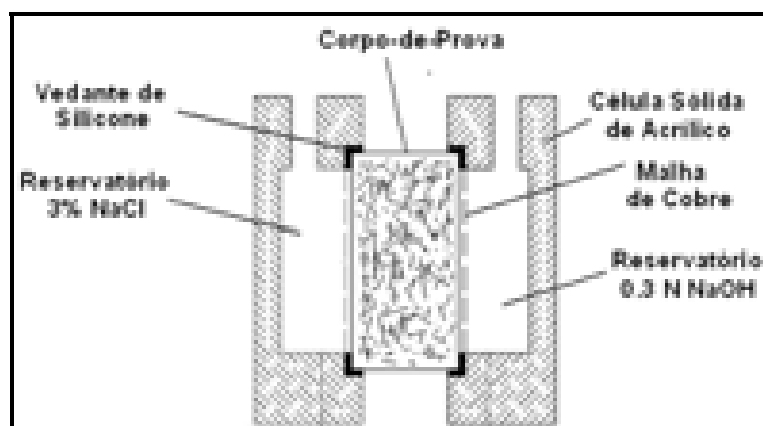


Figura 2.19 – Configuração do ensaio rápido de penetrabilidade de cloretos (adaptado de WHITING, 1981 *apud* CALÇADA, 2004).

Tabela 2.5 – Classificação do concreto frente a penetrabilidade de cloretos, por meio da carga total passante (ASTM C1202 : 2009).

Carga total passante	Penetrabilidade de cloretos no concreto
>4000	Alta
2000 – 4000	Moderada
1000 – 2000	Baixa
100 – 1000	Muito baixa
<100	Desprezível

De acordo com Calçada (2004), um dos principais questionamentos, referentes a este ensaio é o fato de que, sob a ação de um campo elétrico, não só os cloretos, mas todos os íons em solução se movimentam e, portanto, a carga elétrica medida não diz respeito somente a cloretos. Além disso, a carga passante no corpo-de-prova não considera que uma parcela dos cloretos que penetrar no concreto será fixada pelos produtos de hidratação do cimento. Sendo questionado também quanto a voltagem aplicada, que é muito elevada, produzindo o aquecimento do corpo-de-prova por efeito Joule e isto altera a mobilidade dos íons, bem como a resistividade do concreto, tornando os valores lidos irreais.

Castellote (1997 *apud* SALTA,1999) fez um estudo aprofundado da influência de diferentes parâmetros experimentais, nomeadamente das alterações na microestrutura e na interação dos cloretos com a matriz cimentícia resultante da aplicação da corrente elétrica, do qual se concluiu que há efetivamente uma alteração da microestrutura do concreto em particular dos poros capilares de menor dimensão devido às alterações iônicas na solução intersticial.

Prudêncio Jr. *et al.* (1999) constataram que o ensaio prescrito pela ASTM C1202 : 2009 mede propriedades elétricas do concreto e não sua habilidade de resistir à penetração dos cloretos, quando observou-se que carga total passante no corpo-de-prova se correlaciona bem com a condutividade elétrica do concreto e com a corrente inicial medida no ensaio.

Meck e Sirivatnanon (2003) submeteram vários tipos de concretos ao ensaio de difusão por imersão e o ensaio prescrito pela ASTM C1202 : 2009. Neste ensaio foi quantificada a carga total passante dos concretos na idade de 28 dias, já aquele após quatro semanas foi medido a penetração de cloretos nos concretos referente as idades de 28 dias e 91 dias, por meio do método colorimétrico (nitrato de prata). Em seguida, foram feitos os cruzamentos entre os resultados referentes aos ensaios, conforme mostra a Figura 2.20, e notou-se que não há correlação satisfatória, pois o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) foi extremamente baixo. Diante disso, Meck e Sirivatnanon (2003) confirmaram o que Andrade *et al.* (1999) haviam constatado, que o método colorimétrico, tomado apenas a medida de profundidade de cloretos, não tem o poder de identificar exatamente a concentração de cloretos, pois o

nitrito de prata pode reagir com os cloretos numa ampla faixa de concentração. Com isso, somado com a não habilidade do ensaio da ASTM C 1202 : 2009 de identificar a resistência de cloretos, conforme salientado por Prudêncio *et al.* (1999), pode ter levado a não obtenção de uma correlação.

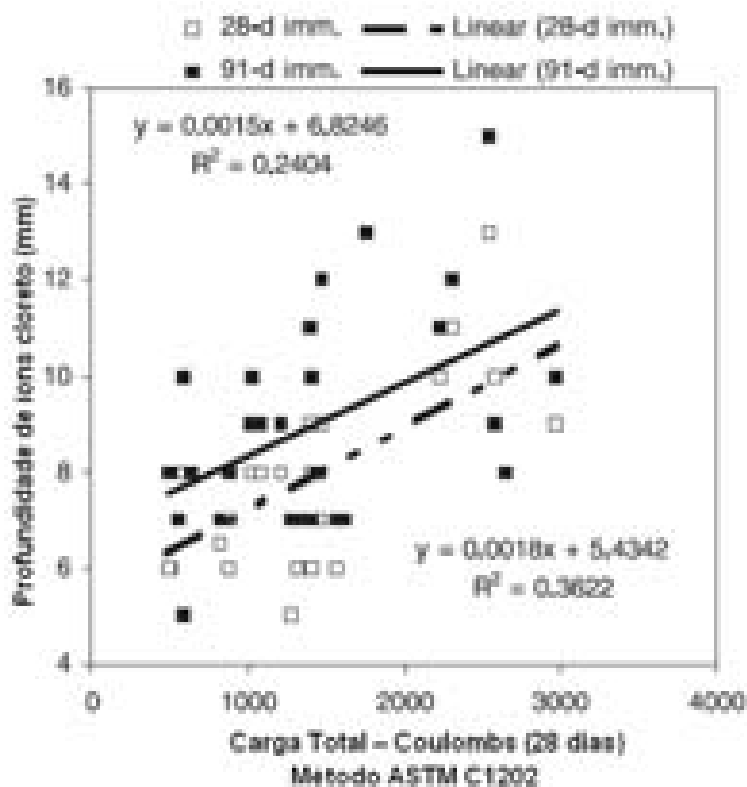


Figura 2.20 – Correlação entre a profundidade de cloretos (método colorimétrico) e a carga total passante por meio do método ASTM C1202 ( MECK, SIRIVIVATNANON, 2003).

## b) Ensaios de migração em condições de fluxo estacionário

Em fluxo estacionário, em que o mecanismo de migração prevalece, usa-se a equação de Nernst-Planck modificada para se determinar o coeficiente de difusão, apresentado na Equação 2.18 (ANDRADE, 1993; TANG, 1996; SALTA, 1999; CASTELLOTE *et al.*, 2001; SAMSON *et al.*, 2003; FRIEDMANN *et al.*, 2004; NARSILIO *et al.*, 2007).

Sabendo disso, pode-se utilizar o esquema do ensaio proposto por Andrade (1993), conforme a Figura 2.21. Nela observa-se que a célula de migração é muito parecida com a de difusão, com a diferença da presença dos eletrodos em ambas as câmaras.

Nos ensaios de migração, a câmara que contém os cloretos é chamada de câmara catódica e possui o eletrodo negativo. Neste eletrodo há combinação da água com elétrons livres, liberando gás hidrogênio e íons hidroxila. A outra câmara é denominada anódica e contém o eletrodo positivo que, se for metálico, é dissolvido e se combina com os íons oxigênio

originado da hidrólise da água, com conseqüente liberação de íons de hidrogênio (CALÇADA, 2004).

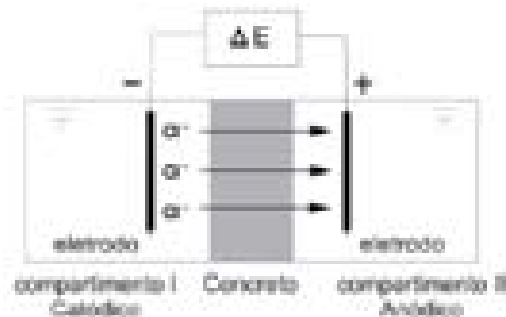


Figura 2.21 – Esquema de ensaio de migração de cloretos (ANDRADE, 1993).

Sabe-se que os métodos elétricos surgiram para se ter uma resposta rápida da durabilidade quanto à difusão dos cloretos. Com isso, vários autores estão sempre tentando correlacionar estes métodos com aqueles que se configuram como sendo ensaios de difusão. Yang (2005) comparou os coeficientes de difusão obtidos por meio do ensaio de imersão de cloretos com relação aos coeficientes de difusão obtidos por meio do ensaio de migração no regime estacionário, utilizando-se a equação modificada de Nernst-Plank, conforme mostra na Figura 2.22.

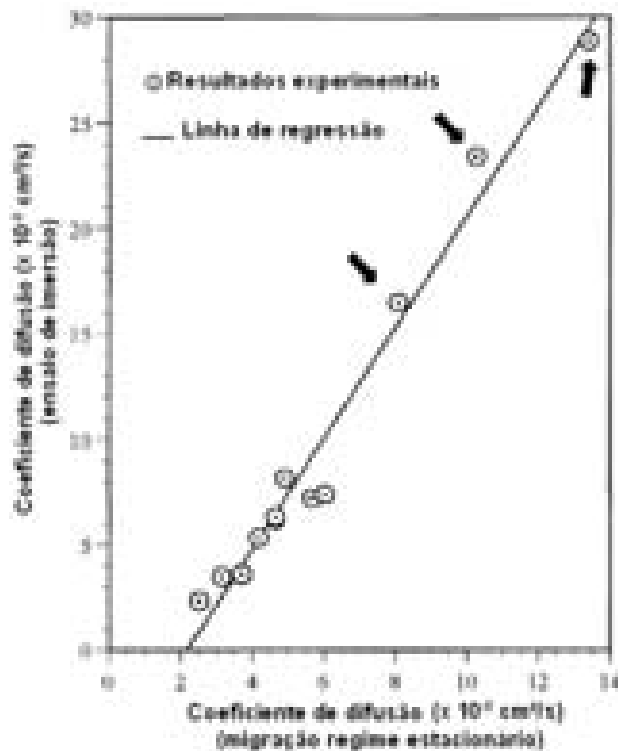


Figura 2.22 – Relação entre o coeficiente de difusão (ensaio de imersão) e coeficiente de difusão (migração regime estacionário) por meio do método rápido proposto por Yang (Adaptado de YANG, 2005).

Observa-se que Yang (2005) obteve uma regressão linear entre os resultados, além de concluir que o coeficiente resultante do ensaio de migração equivale, aproximadamente, à metade do coeficiente obtido por meio do ensaio de imersão, quando se trata principalmente de concretos sem adições e alta relação água/aglomerante, os quais estão indicados na Figura 2.22 por meio de pequenas setas.

**c) Ensaio de migração em condições de fluxo não estacionário com ênfase na proposta de Tang e Nilsson (1992)**

Quando se tratar de migração em condições de fluxo não estacionário, deve-se considerar primeiramente a proposta de avaliação de Tang e Nilsson (1992) principalmente por ser um método de ensaio prático e rápido. Esses autores desenvolveram um procedimento de ensaio com base na determinação da profundidade de penetração de cloretos por medida colorimétrica, seguindo a hipótese de que o fluxo de íons é proporcional à sua força motriz, a qual é composta por duas parcelas, sendo uma de origem química, dada pela diferença de concentração das soluções, e a outra de origem elétrica, devida à diferença de potencial elétrico. Este método obedece a Equação 2.25, que representa a segunda lei de Fick modificada e os perfis de concentração de cloretos com os parâmetros  $x_f$  e  $x_d$ , na Figura 2.17.

Tang e Nilsson (1992) consideraram que o coeficiente de difusão poderia ser obtido a partir da profundidade de penetração de cloretos, conforme a Equação 2.27. Para isso, primeiramente determina-se o ponto  $x_f$  por meio da Equação 2.26, que solicita apenas a medida de  $x_d$  que, por sua vez, é obtida a partir do método colorimétrico com nitrato de prata. É importante salientar, que a norma NT BUILD 492 : 1999 prescreve o ensaio com base na proposta de Tang e Nilsson (1992) e Tang (1996), a qual foi utilizada no programa experimental do presente estudo.

$$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_f}{t} \quad (2.25)$$

$$x_f = x_d - 1,061x_d^{0,589} \quad (2.26)$$

$$D = 1,189 \cdot 10^{-11} \left( \frac{x_f = x_d - 1,061x_d^{0,589}}{t} \right) \quad (2.27)$$

onde:

$D$  = coeficiente de difusão (m<sup>2</sup>/s);

$x_f$  = posição do ponto de inflexão do perfil de penetração de cloretos (m);

$x_d$  = profundidade de penetração de cloreto (m);

$t$  = tempo (s);  
 $Z$  = carga elétrica;  
 $R$  = constante dos gases (J/mol.K);  
 $T$  = temperatura absoluta (K);  
 $E$  = potencial elétrico (V).

O arranjo de ensaio proposto por Tang e Nilsson (1992) pode ser visto na Figura 2.23. Tang (1996) recomenda a adoção de 30 V para concretos convencionais e no máximo 40 V para concretos de alto desempenho. Ele propõe um critério de escolha de tempo de ensaio, por meio da corrente inicial. Quando se nota que um concreto admite uma baixa corrente inicial, pode-se dizer que este concreto resiste bem à passagem de corrente elétrica. Diante disso, leva-se a um maior tempo de ensaio, ao contrário de um concreto considerado de baixo desempenho.

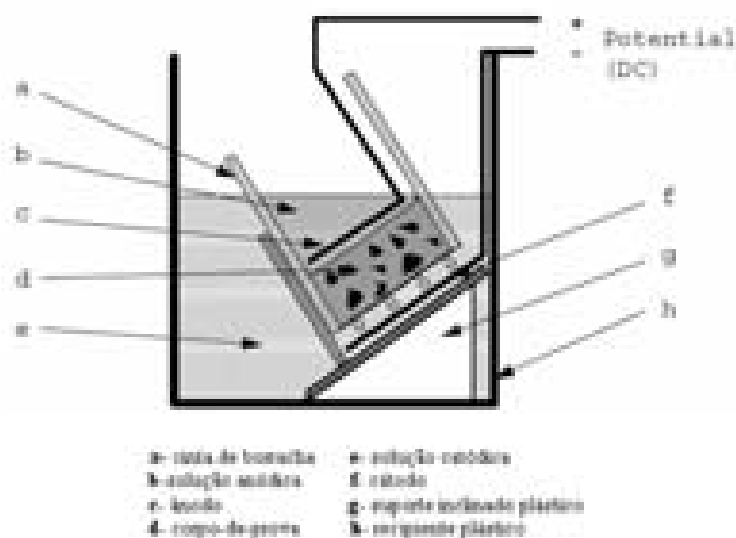


Figura 2.23 – Arranjo experimental do ensaio proposto por Tang e Nilsson (TANG, NILSSON, 1992; NT BUILT: 1999).

A Figura 2.24 apresenta uma comparação dos resultados obtidos por meio do ensaio de imersão e do ensaio proposto por Tang e Nilsson (1992). Observa-se que há uma boa correlação, principalmente quando comparados com os concretos de baixa relação água/cimento. Yang (2005) também obteve uma correlação satisfatória entre o ensaio de migração em regime não estacionário, proposto por ele, e o ensaio de imersão.

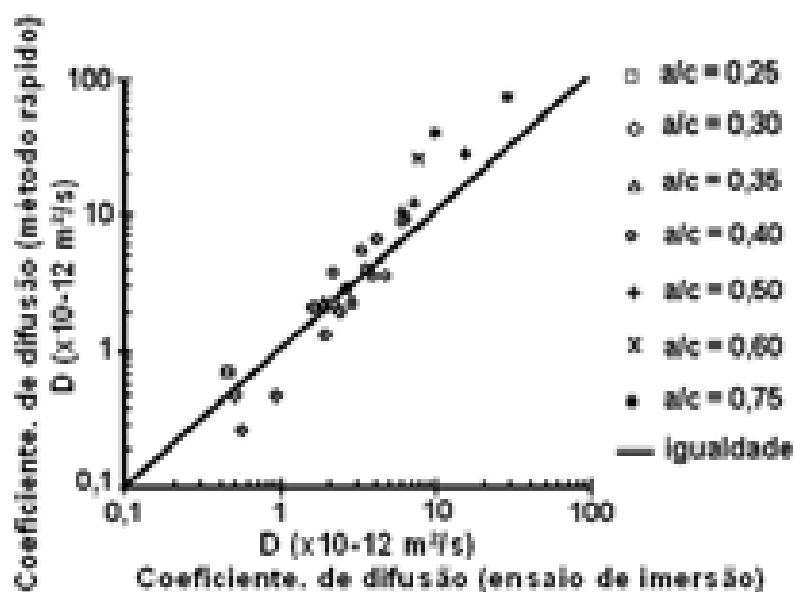


Figura 2.24 – Comparação entre o método proposto por Tang e Nilsson (1992) e o ensaio de imersão, com cálculo da difusividade pela segunda lei de Fick (TANG, 1996).

O ensaio de Tang e Nilsson (1992), na opinião de Zhang e Gjrv (1995) tem uma boa base teórica, e boa formulação matemática, porém tem algumas fontes de erro, tal como a não consideração da fixação de cloretos pelo cimento hidratado. Isto leva a obtenção de coeficientes de difusão de concretos com alta capacidade de fixação de cloretos maiores do que os obtidos por ensaios em condições estacionárias. Já para Streicher e Alexander (1995), o método proposto por Tang e Nilsson (1992)  o melhor atualmente disponível, aliando simplicidade, curta duração, boa base teórica e versatilidade.

Salta (2000) comparou coeficientes de difusão obtidos em ensaios de migração estacionária e não estacionária e concluiu que, em geral, que os coeficientes obtidos em condições de fluxo estacionário foram menores do que os resultantes de ensaios em condição não estacionária e ressaltou que a classificação dos concretos foi a mesma, independente do método utilizado.

Tong e Gjvr (2001) também verificaram que os coeficientes de difusão obtidos em ensaio de migração estacionária foram bem menores do que os coeficientes obtidos em ensaio de migração não estacionária, mas que, apesar disso, existe uma boa correlação entre os coeficientes, conforme mostrado na Figura 2.25.

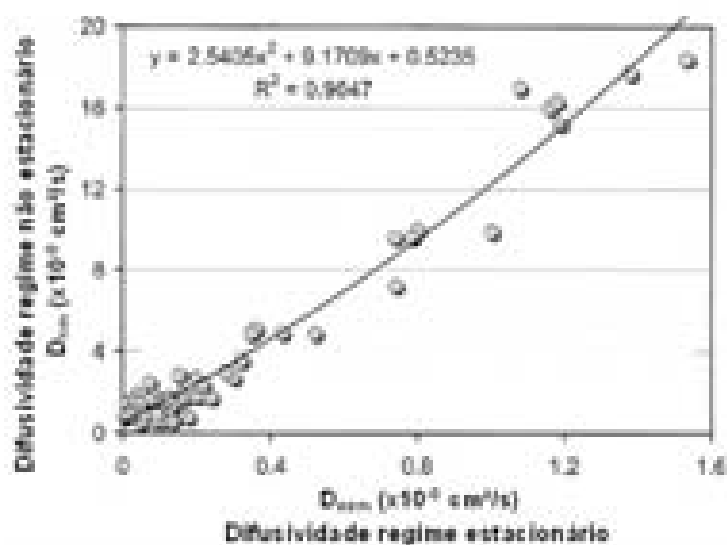


Figura 2.25 – Correlação entre a difusividade de coredos dos dois regimes (estacionário e não estacionário) através de ensaio de migração (TONG, GJØRV, 2001).

Por fim, para se ter uma resposta qualitativa sobre o concreto analisado por meio do ensaio proposto por Tang e Nilsson (1992), pode-se basear na classificação de GjØrv (2001), que propõe que o concreto seja agrupado em cinco classes de resistência à penetração de coredos, conforme mostra a Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Classes de resistência do concreto à penetração de coredos (GJØRV, 2001)

<b>Coefficiente de difusão em regime não estacionário (<math>D_{ns}</math>)</b>	<b>Classe de resistência à penetração de coredos</b>
$D_{ns} \geq 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Reduzida
$10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} < 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Moderada
$5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} \leq 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Elevada
$2,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} \leq 5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Muito elevada
$D_{ns} \leq 2,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Ultra elevada

## **CAPÍTULO 3**

### **PROGRAMA EXPERIMENTAL:**

#### **MATERIAIS E MÉTODOS**

O programa experimental deste estudo foi elaborado com intuito de avaliar o comportamento de cada concreto no estado endurecido, pela atuação de alguns mecanismos de transportes de massa em diferentes concretos.

Dessa forma, neste capítulo são apresentadas as variáveis de estudo, a caracterização dos materiais utilizados, o modelo de corpo-de-prova adotado, o preparo dos concretos, a caracterização do concreto no estado fresco e endurecido e os métodos de avaliação dos mecanismos de transporte de massa no concreto (absorção capilar, penetração de água sob pressão, permeabilidade ao ar, penetrabilidade de cloretos e ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário).

### 3.1 VARIÁVEIS DO TRABALHO

Pretende-se nesta pesquisa dar uma contribuição ao avanço tecnológico do concreto estudando algumas das variáveis que interferem na microestrutura do concreto. Para tanto, foram selecionadas as seguintes variáveis independentes:

**a) Tipo de adição mineral (tipo de concreto)** – empregada no concreto em misturas binárias e utilizada em substituição parcial ao cimento Portland, com teores percentuais em massa. Os teores de substituição foram embasados pela pesquisa bibliográfica realizada anteriormente ao estudo experimental e as adições minerais adotadas, no presente estudo, são amplamente estudadas por pesquisadores de diversas instituições da área de tecnologia do concreto, sendo, portanto, um assunto com grande respaldo da literatura.

- a.1)** Sem adição mineral (situação de referência);
- a.2)** Sílica ativa (10%);
- a.3)** Escória de alto-forno (50%).

**b) Relação água/aglomerante** – a variação da relação água/aglomerante propicia a obtenção de concretos com diferentes estruturas internas, conseqüentemente, têm-se alteradas além das propriedades mecânicas as propriedades relacionadas à durabilidade, tais como: permeabilidade, absorção, difusividade iônica e resistividade elétrica, entre outras.

- b.1)** Relação  $a/ag = 0,35$ ;
- b.2)** Relação  $a/ag = 0,45$ ;
- b.3)** Relação  $a/ag = 0,55$ .

De acordo com a norma brasileira de projeto de estruturas de concreto, ABNT NBR 6118:2003, tem-se que a variável relação água/aglomerante na presente pesquisa compreende uma faixa de valores que corresponde às classes de agressividade ambiental forte e muito forte (classes III e IV, respectivamente). Essas classes caracterizam, além dos ambientes industriais, os ambientes marinho (classe III) e de respingos de maré (classe IV), que representam os ambientes típicos das torres de energia eólica, que, por sua vez, consistem no alvo referencial global da pesquisa. Conforme a tabela de correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto (Tabela 7.1 – subitem 7.4.2 da norma brasileira de projeto de estruturas de concreto), a relação água/aglomerante deve ser de no máximo 0,55 (em massa) para o ambiente marinho mais brando.

**c) Região do concreto** – sabe-se que as características do concreto de cobrimento são diferentes das do concreto confinado no interior das peças estruturais. Estas diferenças se dão principalmente pela absorção das fôrmas, evaporação de água para o ambiente, efeito parede, entre outras. Desta forma, estudos para a caracterização desta região são muito importantes a fim de serem determinados parâmetros de desempenho e de vida útil da estrutura.

**c.1)** Região referente ao cobrimento;

**c.2)** Região referente à parte interna;

**d) Carbonatação** – avaliou-se o efeito da carbonatação natural na região do concreto de cobrimento, tendo em vista toda a análise dos mecanismos de transporte considerada na pesquisa, todavia restringindo-se o campo de estudos apenas para os concretos de relação a/ag igual a 0,55.

**d.1)** Concreto protegido da ação do CO<sub>2</sub>;

**d.2)** Concreto sujeito à carbonatação natural.

Não houve preocupação no experimento global em proteger os corpos-de-prova da ação do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) do ar; portanto, os concretos em geral estiveram sujeitos à carbonatação natural, exceto aqueles destinados ao estudo particularizado para se avaliar o efeito da carbonatação natural, que ficaram protegidos da ação do CO<sub>2</sub> do ar.

Descritas as variáveis adotadas, primeiramente foram geradas 18 situações (3 situações com adições minerais x 3 relações água/aglomerante x 2 regiões do concreto), em seguida, mais 6 situações (3 adições x 2 regiões do concreto) referentes ao estudo da carbonatação, totalizando-se 24 situações de estudo. Estas situações foram submetidas aos ensaios que avaliam os mecanismos de transporte de massa, quais sejam, absorção capilar, penetração de água sob pressão, permeabilidade ao ar, penetrabilidade de cloretos e migração de cloretos em regime não estacionário. A seguir, na Figura 3.1, um resumo das combinações do trabalho experimental.

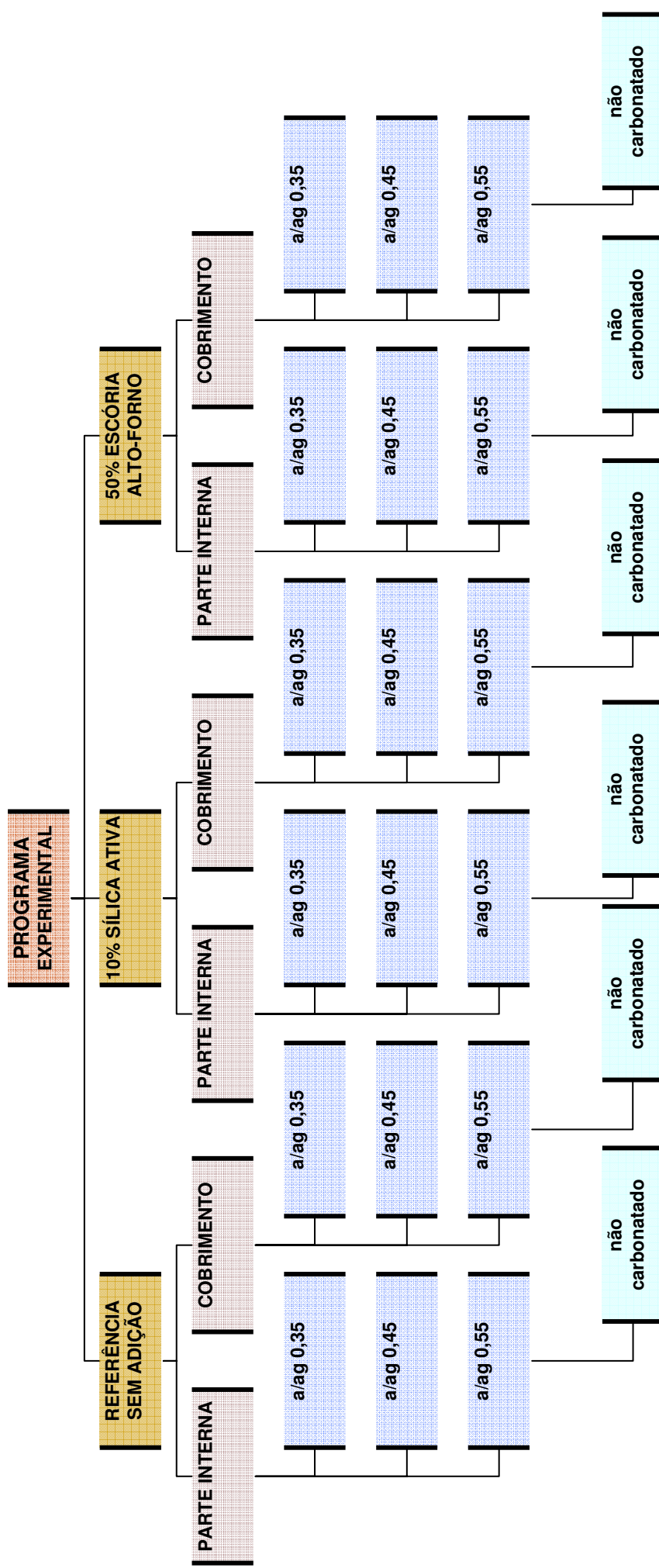


Figura 3.1 – Fluxograma das combinações do trabalho experimental.

## **3.2 PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO**

Buscando uma melhor interpretação dos resultados da pesquisa, os valores individuais obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade, penetração de água sob pressão, permeabilidade ao ar, penetrabilidade de cloretos e migração de cloretos em regime não estacionário foram submetidos à uma análise estatística.

Com intuito de determinar as variáveis do estudo que exercem influência nas propriedades estudadas, um planejamento fatorial completo foi adotado para o programa experimental da pesquisa.

O planejamento fatorial é uma técnica bastante utilizada quando se tem duas ou mais variáveis independentes. Essa técnica é mais eficiente do que os experimentos simples, pois permite tirar conclusões mais gerais, por meio de análise das interações das variáveis estudadas e não apenas dos seus efeitos individuais (CALADO; MONTGOMERY, 2003).

No presente planejamento fatorial, as variáveis de estudo relação água/aglomerante, adições minerais, região do concreto e carbonatação<sup>1</sup> são denominados fatores, enquanto que as três relações água/aglomerante, três diferentes situações para as adições minerais, duas regiões do concreto e as duas situações para carbonatação (carbonatado, não carbonatado) são os níveis escolhidos. Um planejamento fatorial completo pode ser representado por  $b^x$ , onde  $x$  é o número de fatores e  $b$  é o número de níveis. Se o número de níveis de todas as variáveis consideradas, exceto carbonatação, fossem iguais, seria possível planejar o presente programa experimental por meio do planejamento fatorial com pontos centrais, que tem a vantagem de reduzir o número de ensaios sem perder o efeito de resposta, conforme discutido por Calado e Montgomery (2003). No entanto, como isso não foi possível para o presente programa experimental, adotou-se, então, um planejamento fatorial completo para a análise dos dados.

Com relação os testes de significância deste planejamento experimental, estes foram realizados por análise de variância (ANOVA) utilizando-se o programa Statistica South América<sup>®</sup>, adotando-se um intervalo de confiança igual a 95% e, conseqüentemente, um nível de significância de 5%. Tais análises são apresentadas em tabelas de ANOVA, onde podem ser observadas quais variáveis de estudo foram significativas nas propriedades relacionadas com o concreto e quais não apresentaram influência significativa. Também se

---

<sup>1</sup> O efeito da Carbonatação é considerada uma variável apenas para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,55, conforme apresentado no item 1.1.

obtem da ANOVA a intensidade da significância dos fatores de estudo e a análise das interações entre tais fatores.

### 3.3 MATERIAIS EMPREGADOS

Os materiais utilizados para as dosagens dos concretos preparados para o estudo experimental, assim como os concretos empregados na pesquisa, além de todos os resultados dos ensaios de caracterização realizados são apresentados a seguir. Todos os ensaios, bem como o estudo de dosagem dos concretos, foram realizados nos laboratórios do Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A.

#### 3.3.1 Cimento Portland

O cimento portland utilizado na preparação dos concretos em estudo foi o cimento CP II F-32 (ABNT NBR 11578:1991). O CP II F-32 é um cimento Portland composto com fíler calcário, em cuja composição têm-se o clínquer mais o sulfato de cálcio (gipsita) encontrados em teores que variam de 90% a 94% e o material carbonático (fíler calcário) de 10% a 6%, de maneira correspondente. Decidiu-se utilizar este cimento, por ser o mais utilizado na região metropolitana de Goiânia, sendo, portanto, o mais acessível no momento que se iniciou o programa experimental, com isso evitou-se atrasos no cronograma proposto pela presente pesquisa.

Os resultados dos ensaios da caracterização física e mecânica do cimento CP II F-32 estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Caracterização física e mecânica do cimento: CP II F-32.

Características ou Propriedades Determinadas		Método de Ensaio	Resultado	Exigências NBR 11578:1991
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 23:2001	3,00	N.E.*
Finura	Resíduo na peneira 200 (%)	NBR 11579:1991	2,1	≤ 12,0
	Resíduo na peneira 325 (%)	NBR 12826:1993	5,1	N.E.
	área específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	NBR NM 76:1998	4930	≥ 2600
Tempos de pega	início de Pega (h, min)	NBR NM 65:2003	2:30	≥ 1 h
	fim de Pega (h, min)		4:00	≤ 10 h
Água de Consistência – Pasta (%)		NBR 11580:1991	29,6	N.E.
Expansibilidade de Le Chatelier a quente (mm)		NBR 11582:1991	0,0	≤ 5,0
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	NBR 7215:1996	23,5	≥ 10,0
	7 dias		30,1	≥ 20,0
	28 dias		39,2	≥ 32,0 e ≤ 49,0

\* N.E. = Não Especificado.

As principais características químicas do cimento utilizado, CP II - F 32, estão apresentadas pela Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Caracterização química do cimento: CP II F–32.

Características ou Propriedades Determinadas		Método de Ensaio	Resultado	Exigências NBR 11578:1991
Componentes Químicos (%)	perda ao fogo	NM NBR 18:2004	9,88	≤ 6,5
	resíduo insolúvel	NM NBR 15:2004	3,23	≤ 2,5
	dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	Procedimento FURNAS IT.DCT.TC.403	17,69	N.E.*
	óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		5,01	N.E.
	óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		2,37	N.E.
	óxido de cálcio (CaO)		60,46	N.E.
	óxido de cálcio livre (CaO)		1,40	N.E.
	óxido de magnésio (MgO)		1,73	≤ 6,5
	trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )		1,82	≤ 4,0
	sulfato de cálcio (CaSO <sub>4</sub> )		-	3,09
Álcalis Totais	óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	Procedimento FURNAS IT.DCT.TC.409	0,34	N.E.
	Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)		0,64	N.E.
	equivalente alcalino		0,76	N.E.
Álcalis Solúveis em Água	óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	Procedimento FURNAS IT.DCT.TC.413	0,32	N.E.
	Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)		0,37	N.E.
	equivalente alcalino		0,56	N.E.

\* N.E. = Não Especificado.

### 3.3.2 Adições minerais

As adições minerais empregadas nos concretos confeccionados, em substituição parcial ao cimento e em composição binária com ele, foram a escória de alto-forno moída e a sílica ativa.

Na Tabela 3.3, apresentada a seguir, estão descritas as características químicas e físicas da escória de alto-forno utilizada.

Tabela 3.3 – Caracterização química e física da escória de alto-forno moída.

Características ou Propriedades Determinadas		Método de Ensaio	Resultado	Exigências NBR 12653:1992
massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 23:2001	2,91	N.E.*
resíduo na peneira 325 (%)		NBR 12826:1993	2,7	≤ 34,0
área específica BET (cm <sup>2</sup> /g)		-	3590	N.E.
Componentes Químicos (%)	perda ao fogo	NM NBR 18:2004	0,0	≤ 6,0
	dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	Procedimento FURNAS IT.DCT.TC.403	34,55	N.E.
	trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )		0,29	≤ 5,0
	óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		13,50	N.E.
	óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		0,64	N.E.
	óxido de cálcio (CaO)		41,65	N.E.
	óxido de magnésio (MgO)		6,79	N.E.
	Sulfato de cálcio (CaSO <sub>4</sub> )		-	0,49
Álcalis Totais	óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	Procedimento FURNAS IT.DCT.TC.409	0,37	N.E.
	óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)		0,97	N.E.
	equivalente alcalino		1,00	N.E.
Álcalis Solúveis em Água	óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	Procedimento FURNAS IT.DCT.TC.413	0,12	N.E.
	óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)		0,18	N.E.
	equivalente alcalino		0,24	N.E.

\* N.E. = Não Especificado.

Uma análise por difração de raios X foi realizada em uma amostra da escória de alto-forno, sendo identificadas as fases cristalinas descritas no difratograma apresentado pela Figura 3.2.

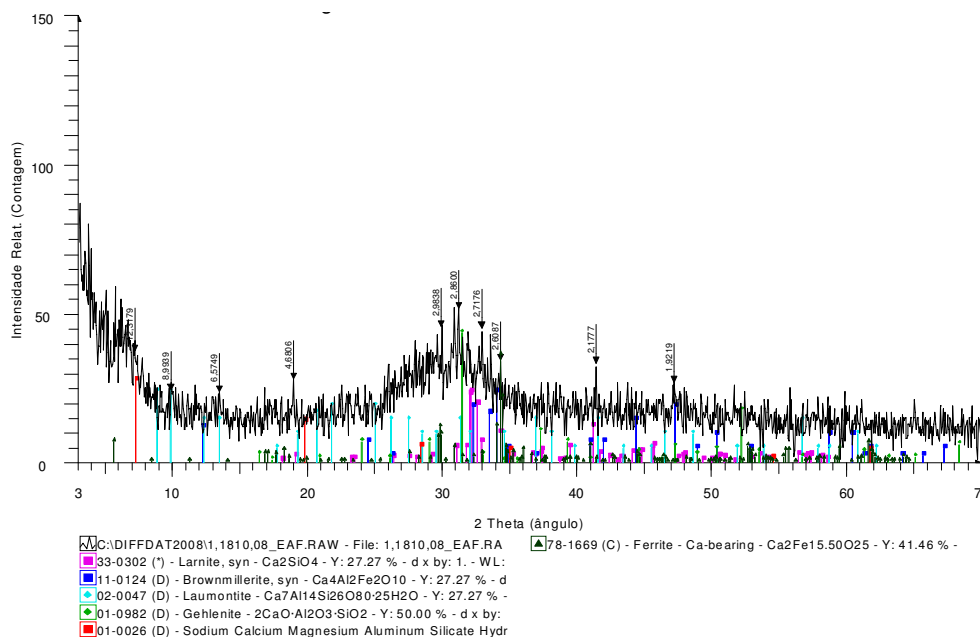


Figura 3.2 – Difratoograma de raios X da escória de alto-forno.

As características químicas e físicas da sílica ativa utilizada no trabalho são apresentadas a seguir, na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Caracterização química e física da sílica ativa.

Características ou Propriedades Determinadas		Método de Ensaio	Resultado	Exigências NBR 13956:1997
massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 23:2001	2,23	N.E.*
resíduo na peneira 325 (%)		NBR 12826:1993	----	N.E.
Componentes Químicos (%)	perda ao fogo	NM NBR 18:2004	2,61	≤ 6,0
	dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	Procedimento FURNAS IT.DCT.TC.403	93,01	≥ 85,0
	Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		0,05	N.E.
	óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		0,05	N.E.
	óxido de cálcio (CaO)		0,24	N.E.
	Óxido de magnésio (MgO)		0,25	N.E.
	Sulfato de cálcio (CaSO <sub>4</sub> )		-	0,05
Álcalis Totais	óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	Procedimento FURNAS IT.DCT.TC.409	0,53	N.E.
	óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)		0,80	N.E.
	equivalente alcalino		1,06	N.E.
Índice de atividade pozolânica com cimento (%)		NBR 5752:1992	76,90	N.E.
Índice de atividade pozolânica com cal (MPa)		NBR 5752:1992	6,1	N.E.

\* N.E. = Não Especificado.

Uma amostra de sílica ativa foi submetida a uma análise por difração de raios X, tendo sido identificadas as fases cristalinas apresentadas no difratograma da Figura 3.3. Percebe-se na

sílica ativa, sua característica predominantemente amorfa, tendo-se no difratograma poucos picos cristalinos e uma banda amorfa típica desse material.

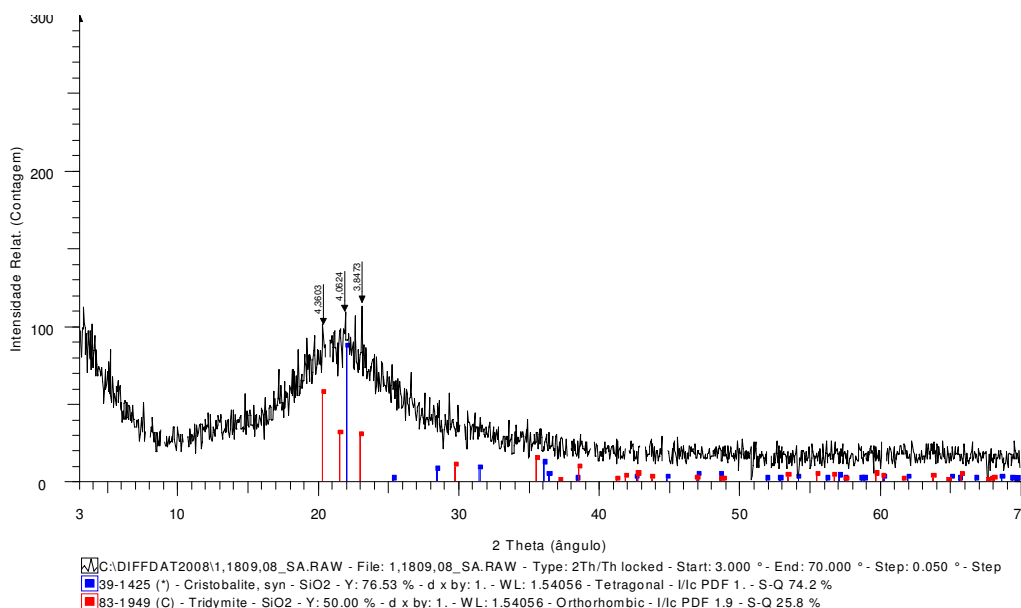


Figura 3.3 – Difratograma de raios X da sílica ativa.

### 3.3.3 Agregados

#### a) Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural de leito de rio, de natureza quartzosa, classificada como areia de zona utilizável<sup>2</sup>, de acordo com a norma brasileira de especificação ABNT NBR 7211:2005. A caracterização desse agregado está apresentada na Tabela 3.5.

<sup>2</sup> Pela classificação da ABNT NBR 7211:2005 da revisão anterior à atual, do ano de 1983, o agregado miúdo se classifica como uma areia fina (zona 2).

Tabela 3.5 – Caracterização do agregado miúdo.

Ensaio Realizado	Norma	Areia Natural	Exigências NBR 7211:2005
Absorção de água (%)	NBR NM 30:2001	0,7	N.E.*
Módulo de finura	NBR NM 248:2003	1,90	N.E.
Massa específica aparente do agregado seco (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52:2003	2,55	N.E.
Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )		2,57	N.E.
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,60	N.E.
Massa unitária – Estado solto (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR 7251:1982	1,37	N.E.
Teor de material pulverulento (%)	NBR NM 46:2003	1,85	≤ 5,0%
Teor de matéria orgânica (+/- clara)	NBR NM 49:2001	+ clara	solução deve ser mais clara do que a
Teor de partículas leves (%)	NBR 9936:1987	----	N.E.
Teor de argila em torrões e materiais friáveis (%) – Via úmida	NBR 44:2005	0,07	< 3,0%
Teor de argila em torrões e materiais friáveis (%) – Via seca	NBR 7218:1987	0,07	< 3,0%

\* N.E. = Não Especificado.

Na Tabela 3.6 está apresentada a distribuição granulométrica do agregado miúdo e, para uma melhor visualização destas informações, tem-se a sua representação gráfica na Figura 3.4, ambas apresentadas a seguir.

Tabela 3.6 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneiras		1ª Determinação			2ª Determinação			% retida acumulada Média	Limite NBR 7211:05 (% retida acumulada) Limite da Zona:	
n.º	Abertura	Massa retida (g)	% retida indiv.	% retida acumul.	Massa retida (g)	% retida indiv.	% retida acumul.		Utilizável	Ótima
3,8"	9,5 mm	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0	0	0-0	0-0
1/4"	6,3 mm	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0	0	0-7	0-0
4	4,75 mm	16,4	2,5	3	17,3	2,5	3	3	0-10	0-5
8	2,34 mm	14,4	2,2	5	12,9	1,9	4	5	0-25	10-20
16	1,18 mm	23,8	3,6	8	28,2	4,2	9	8	5-50	20-30
30	600 µm	105,3	15,9	24	107,3	15,8	24	24	15-70	35-55
50	300 µm	225,4	34,1	58	231,4	34,1	59	58	50-95	65-85
100	150 µm	215,4	32,6	91	221,6	32,6	91	91	85-100	90-95
Fundo (g)		59,9	9,1	100	60,7	8,9	100	100		
Massa Total (g)		660,6			679,4					
Módulo de finura		1,89			1,90					
Módulo de finura médio:		1,90								

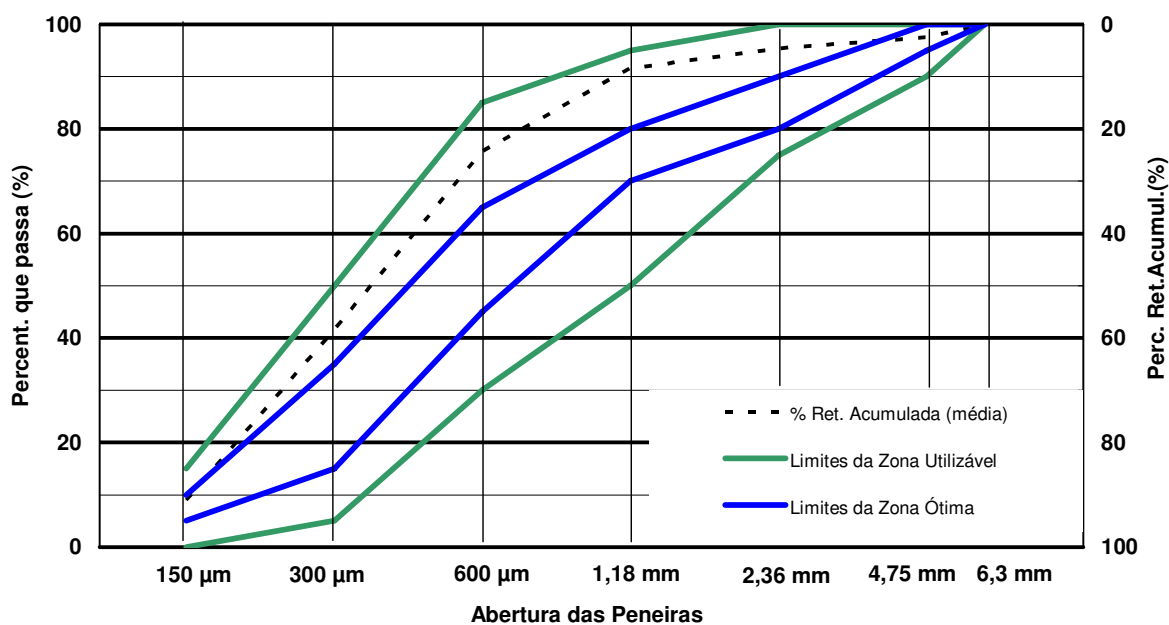


Figura 3.4 – Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo.

## b) Agregado graúdo

O agregado graúdo empregado foi uma pedra britada de rocha de natureza ígnea, classificada litologicamente como um granodiorito. Sua dimensão máxima característica é igual a 12,5 mm e trata-se de um agregado graúdo pertencente à zona granulométrica d/D (relação entre a menor e a maior dimensão do agregado) igual a 4,75/12,5, de acordo com a classificação atual<sup>3</sup> da ABNT NBR 7211:2005. As principais características desse agregado estão dispostas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Caracterização do agregado graúdo.

Ensaio Realizado	Norma	Brita 12,5 mm	Exigências NBR 7211:2005
Absorção de água (%)	NBR NM 53:2003	0,9	N.E.*
Módulo de finura	NBR NM 248:2003	5,66	N.E.
Índice de forma/paquímetro (c/e)	NBR 7809:2006	3,1	≤ 3
Massa específica S.S.S. (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 53:2003	2,61	N.E.
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )		2,59	N.E.
Massa unitária – Estado solto (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR 7251:1982	1,40	N.E.
Teor de material pulverulento (%)	NBR NM 46:2003	1,87	≤ 1,0%

\* N.E. = Não Especificado.

Na Tabela 3.8 está descrita a distribuição granulométrica do agregado graúdo e, para uma melhor visualização destes dados, tem-se a sua representação gráfica por meio da curva granulométrica presente na Figura 3.5, em seqüência.

<sup>3</sup> Pela classificação da ABNT NBR 7211:2005 da revisão anterior desta norma, do ano de 1983, o agregado graúdo se classifica como uma pedra de graduação 0 (brita 0).

Tabela 3.8 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.

Peneiras		1ª Determinação			2ª Determinação			% retida acumul. ul. Média	Limite NBR 7211:05	
n.º	Abertura	Massa retida (g)	% retida indiv.	% retida acumul. .	Massa retida (g)	% retida Indiv.	% retida acumul.		(d/D*:4,75/12,5)	
									(% retida acumulada)	
1/2"	12,5 mm	-	0,0	0	-	0,0	0	0	5	
3/8"	9,5 mm	500,0	14	14	396,3	11,5	12	13	15	
1/4"	6,3 mm	1.164,0	45	45	1.167,2	33,9	45	45	65	
4	4,75 mm	933,0	70	70	858,6	24,9	70	70	100	
8	2,36 mm	882,7	94	94	872,4	25,3	96	95	100	
16	1,18 mm	74,0	96	96	51,4	1,5	97	97		
30	600 µm	15,6	96	96	9,7	0,3	97	97		
50	300 µm	16,0	97	97	10,0	0,3	98	97		
100	150 µm	22,8	97	97	14,3	0,4	98	98		
Fundo (g)		99,8	100	100	65,7	1,9	100	100		
Massa Total (g)		3.707,9			3.445,6					
Módulo de finura		5,64			5,68					
Módulo de finura médio:		5,66								

\* d/D refere-se à zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.

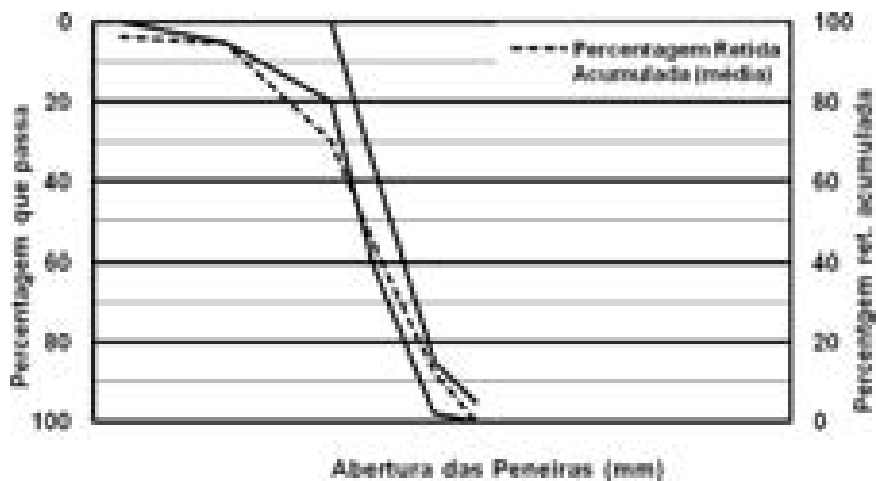


Figura 3.5 – Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo.

Visando caracterizar mineralogicamente o agregado graúdo, bem como conhecer sua natureza litológica, foi realizada uma análise petrográfica, cujos resultados se encontram no Anexo B.

### 3.3.4 Aditivo

O aditivo químico utilizado foi um superplastificante de 3ª geração, com o objetivo de manter constantes as características ligadas à trabalhabilidade dos concretos.

As principais características do aditivo químico empregado estão dispostas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Caracterização do aditivo químico superplastificante.

Características Determinadas	Norma	Resultados
pH	NBR 10908:1990	4,60
Resíduo sólido (%)		43,43
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )		1,10

### 3.3.5 Aço

Nos estudos experimentais fez-se uso do aço CA-50 com diâmetro nominal de 10 mm e do aço CA-60 com 5 mm de diâmetro nominal.

### 3.3.6 Concretos estudados

A metodologia de estudo de dosagem de concreto elaborada pelo IPT/EPUSP foi escolhida para a especificação dos concretos convencionais utilizados no projeto de pesquisa em questão.

Em todos os traços do estudo, obtidos seguindo a metodologia IPT/EPUSP, manteve-se o teor de argamassa seca igual a 57%; a diferenciação entre eles se deu com relação aos teores de cimento, ou seja, na quantidade de cimento em relação à quantidade de agregados secos totais (1:m), obtendo-se três linhas de concreto: um rico (em teor de cimento, 1:3), um pobre (1:5) e um intermediário (1:4).

O estudo de dosagem resultou nos três traços dos concretos de referência e, com base nestes, desenvolveram os traços dos concretos com adições. Para os concretos com adições minerais, fez-se a substituição em massa de cimento (conforme seus teores).

Neste programa experimental os concretos apresentaram três composições de aglomerantes (duas com adições e uma de referência) e três relações a/ag (0,35; 0,45 e 0,55); desta forma, foram estabelecidos nove traços de concreto para a moldagem dos corpos-de-prova, conforme apresentado na Tabela 3.10.

No estado fresco, os concretos foram caracterizados por meio de determinações da massa específica (ABNT NBR 9833:1987) e do teor de ar (ABNT NBR NM 47:2002). Já as características de adensamento foram avaliadas pelo abatimento (ABNT NBR NM 67:1998) do tronco de cone, buscando sempre um abatimento próximo a  $(130 \pm 20)$  mm. No entanto, tornou-se difícil buscar este abatimento, devido principalmente a sensibilidade imposta pelo aditivo superplastificante no concreto, no que diz respeito, na alteração rápida na trabalhabilidade do concreto com pouco teor empregado deste aditivo. Na Tabela 3.11, apresenta-se os resultados de caracterização do concreto no estado fresco.

Tabela 3.10 – Proporcionamento dos concretos estudados.

Concreto	Teor de Adição (%)	a/ag	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de aglomerante (kg/m <sup>3</sup> )	Traço em massa de cimento (cimento:adição :areia:brita)	Teor de argamassa em massa	Teor de superplasti. (%)*
Referência	0	0,35	539	539	1 : 0 : 1,28 : 1,72	0,57	0,73
		0,45	423	423	1 : 0 : 1,85 : 2,15	0,57	0,60
		0,55	351	351	1 : 0 : 2,42 : 2,58	0,57	0,60
Escória de Alto-forno	50	0,35	270	539	0,50 : 0,50 : 1,28 : 1,72	0,57	0,90
		0,45	212	423	0,50 : 0,50 : 1,85 : 2,15	0,57	0,73
		0,55	176	351	0,50 : 0,50 : 2,42 : 2,58	0,57	1,05
Sílica ativa	10	0,35	485	539	0,90 : 0,10 : 1,28 : 1,72	0,57	0,80
		0,45	381	423	0,90 : 0,10 : 1,85 : 2,15	0,57	0,85
		0,55	316	351	0,90 : 0,10 : 2,42 : 2,58	0,57	1,05

\*em relação à massa de aglomerante

Tabela 3.11 – Caracterização do concreto no estado fresco.

Concreto	A/G	Código	Teor de ar (%) NBR NM 47:2002	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> ) NBR 9833:1987	Abatimento do tronco de cone (mm) NBR NM 67:1998
Referência	0,35	R35	3,0	2,29	120
	0,45	R45	5,6	2,22	100
	0,55	R55	7	2,15	115

		R55N	6	2,14	135
Escória de alto-forno	0,35	E35	2,0	2,31	170
	0,45	E45	3,4	2,27	175
	0,55	E55	4,2	2,22	180
		E55N	5,0	2,21	175
Sílica ativa	0,35	S35	3,4	2,29	190
	0,45	S45	4,6	2,24	90
	0,55	S55	5,6	2,18	100
		S55N	3,4	2,18	110

Com o intuito de tornar simples e objetiva a identificação das 24 situações de estudo, lançou-se mão do artifício de criar uma codificação que informasse ao leitor de forma sintética as principais características dos concretos estudados. Esta codificação é apresentada na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Nomenclatura adotada para os vários concretos da pesquisa.

Concreto	a/ag	Código	
		Região do concreto	
		cobrimento	interna
Referência	0,35	RC35	RI35
	0,45	RC45	RI45
	0,55	RC55	RI55
	0,55	RC55N*	RI55N*
Escória	0,35	EC35	EI35
	0,45	EC45	EI45
	0,55	EC55	EI55
	0,55	EC55N*	EI55N*
Sílica Ativa	0,35	SC35	SI35
	0,45	SC45	SI45
	0,55	SC55	SI55
	0,55	SC55N*	SI55N*

\*N – não carbonatado.

### 3.4 CORPOS-DE-PROVA

Decidiu-se moldar protótipos de vigas a fim de simular o adensamento real de uma viga, obtendo-se com isso um concreto de cobrimento com características similares a situações corriqueiras de construção, especialmente no que tange ao lançamento e ao adensamento do concreto, além do fato do protótipo ser armado e de ser constituído de uma fôrma usual em chapa de madeira compensada. Os corpos-de-prova foram determinados de acordo com os métodos de ensaio realizados, tendo-se produzido duas dimensões (tipos) de protótipos prismáticos de vigas de concreto, além dos corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro x 20 cm de altura, utilizados para a caracterização do concreto.

Para os ensaios de permeabilidade ao ar, absorção capilar, penetrabilidade de cloretos e o ensaio de migração (regime não estacionário) (descritos no item 3.5), 60 protótipos prismáticos de vigas de concreto nas dimensões de 20 cm de largura, 20 cm de altura e 52 cm de comprimento foram moldados. Já para o ensaio de penetração de água sob pressão foram preparados 12 protótipos nas dimensões de 20 cm de largura, 25 cm de altura e 65 cm de comprimento. Todos os protótipos prismáticos de vigas de concreto foram confeccionados com fôrmas de madeira compensada plastificada de 18 mm de espessura.

A Figura 3.6 ilustra as fôrmas de madeira empregadas na confecção dos protótipos prismáticos de vigas de concreto.

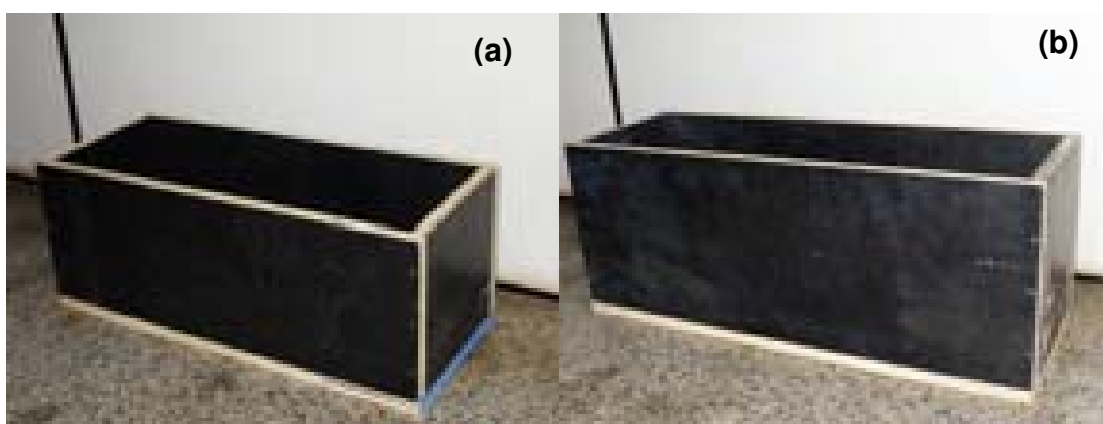


Figura 3.6 – Fôrmas dos protótipos de viga: (a) fôrma de dimensões 20 cm x 20 cm x 52 cm, (b) fôrma de dimensões 20 cm x 25 cm x 65 cm.

Quanto às armaduras utilizadas, as fôrmas foram preparadas com 4 barras de aço CA-50 de 10 mm e 4 estribos de aço CA-60 de 5 mm soldados, exceto no caso dos protótipos de vigas destinados ao ensaio de absorção capilar que sofreram corte transversal para obtenção de três cubos de concreto. Para este ensaio, os protótipos não foram armados, em virtude da necessidade de se executar cortes transversais para a obtenção de três cubos de concreto, operação esta que seria muito difícil com a presença de armaduras. Para garantir a distância entre a armadura e a superfície da fôrma (cobrimento), foram empregados espaçadores plásticos permitindo um cobrimento de 2,5 cm. É importante ressaltar que a armadura nos protótipos tem a principal finalidade de reproduzir condições propícias para que se tenha o lançamento e o adensamento do concreto de maneira muito similar ao que ocorre com a concretagem real de vigas, no entanto, não tendo como objetivo resistir a solicitações mecânicas e, tampouco, obedecer aos critérios de durabilidade prescritos na ABNT NBR 6118:2003.

Na Figura 3.7, têm-se os dois tipos de armações utilizadas e a maneira como elas foram dispostas nas fôrmas.



Figura 3.7 – Vista geral das fôrmas de madeira e das armaduras para moldagem do protótipos prismáticos de viga de concreto. (a) armação referente ao protótipo de dimensões 20 cm x 20 cm x 52 cm, (b) armação referente ao protótipo de dimensões 20 cm x 25 cm x 65 cm.

Para os ensaios de caracterização do concreto no estado endurecido, foram moldados 96 corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 10 cm x 20 cm, no total, para o ensaio de resistência à compressão. Já para o ensaio de porosidade, foram extraídos corpos-de-prova a partir de protótipos de viga ensaiados, sendo os mesmos corpos-de-prova que inicialmente foram usados no ensaio de permeabilidade ao ar.

### 3.4.1 Moldagem, cura e armazenamento dos corpos-de-prova

A mistura do concreto foi realizada em betoneira basculante, com capacidade nominal de 280 litros, em ambiente de laboratório, com variação de temperatura e umidade de 24°C a 27°C e 50% a 60%, respectivamente.

A Figura 3.8 apresenta a sala de dosagem utilizada e os concretos moldados no estado fresco.



Figura 3.8 – Sala de dosagem do concreto: (a) betoneira utilizada e (b) os concretos no estado fresco referente a um tipo de concreto.

A seqüência de introdução dos materiais na betoneira e o tempo de amassamento do concreto seguiram os procedimentos recomendados pelo Laboratório de Concreto de Furnas, obedecendo à seguinte ordem:

- Primeiramente, foi imprimada a betoneira com um pouco de cimento;
- Com a betoneira parada e previamente umedecida foram adicionados os agregados graúdo e miúdo e parte da água;
- Após um minuto de movimentação, seguida de parada da betoneira, foi introduzido o cimento. Quando se tinha um traço com adição mineral, esta era introduzida juntamente com o cimento;
- Imediatamente após a betoneira entrar em movimento, por três minutos foi adicionado o restante da água, deixando somente uma pequena quantidade para se lavar o becker com o aditivo superplastificante, o qual foi adicionado diretamente no concreto, com a betoneira em movimento, durante o início do segundo minuto de amassamento do concreto;
- Após a movimentação da betoneira por três minutos, seguida de uma parada intermediária de três minutos e, posteriormente, mais três minutos com a betoneira em movimento.

Durante a parada intermediária e, após o término da mistura, verificou-se a consistência do concreto mediante a determinação do abatimento do tronco de cone. Ao final desse processo, a descarga do concreto fresco foi feita diretamente em carrinho de mão, sendo, posteriormente, colocado dentro dos moldes com auxílio de conchas e adensado com a utilização de vibrador elétrico de imersão (vibrador agulha). A moldagem e o adensamento

de todos os corpos-de-prova cilíndricos seguiram as recomendações da ABNT NBR 5738:2008.

Finalizada a etapa de moldagem dos corpos-de-prova, eles permaneceram em ambiente de laboratório por 36 horas. Após esse tempo, foram retirados das formas e destinados à câmara úmida cuja temperatura mantinha em  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e a umidade em  $98\% \pm 2\%$ . A Figura 3.9 ilustra a disposição dos corpos-de-prova na câmara úmida.



Figura 3.9 – Câmara úmida: (a) vista geral da câmara úmida e (b) disposição dos corpos-de-prova do presente estudo, na câmara úmida.

Aos 28 dias de idade, os corpos-de-prova referentes aos ensaios de mecanismo de transporte foram encaminhados a um local de armazenagem nomeado como tenda, até atingirem a idade de 84 dias. Na Figura 3.10, visualiza-se o ambiente no qual foram armazenados os corpos-de-prova.

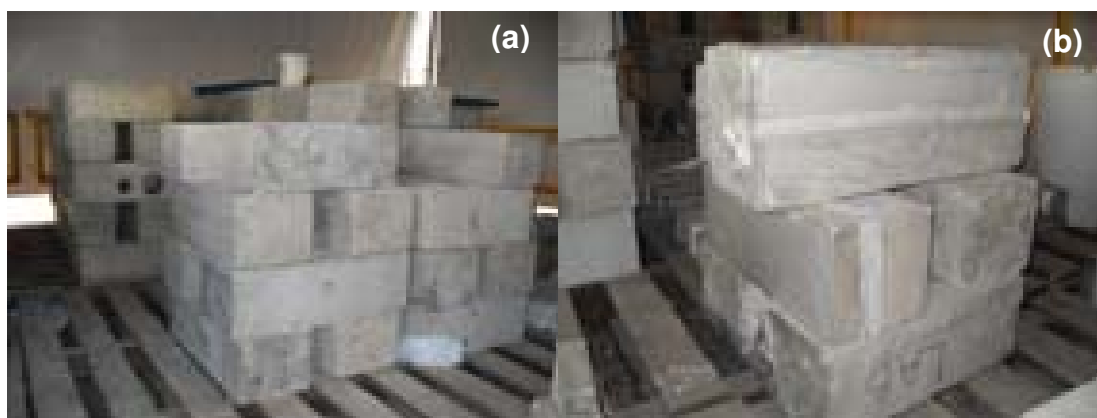


Figura 3.10 – Local de armazenamento dos corpos-de-prova: (a) vista geral dos corpos-de-prova armazenados; (b) corpos-de-prova não carbonatados, envolvidos com um filme de polietileno.

Com relação os corpos-de-prova definidos para não sofrerem o efeito da carbonatação natural, eles foram protegidos com um filme de polietileno transparente, após dois dias de

retirados da câmara úmida, com intuito que eles pudessem secar naturalmente a parte superficial do concreto.

### 3.4.2 Extração e preparação dos corpos-de-prova

Dois dias antes de serem submetidos aos ensaios, protótipos de viga referentes aos ensaios de penetrabilidade de cloretos, ensaio de migração (regime não estacionário), penetração de água sob pressão e porosidade sofreram extrações e cortes. Sendo que para o ensaio de porosidade, conforme foi comentado no subitem 3.4, os corpos-de-prova foram os mesmos utilizados para o ensaio de permeabilidade ao ar, tendo sido obtidos por extração de testemunhos dos protótipos de vigas. A Figura 3.11 ilustra a extração de cilindros de concreto dos protótipos de viga.

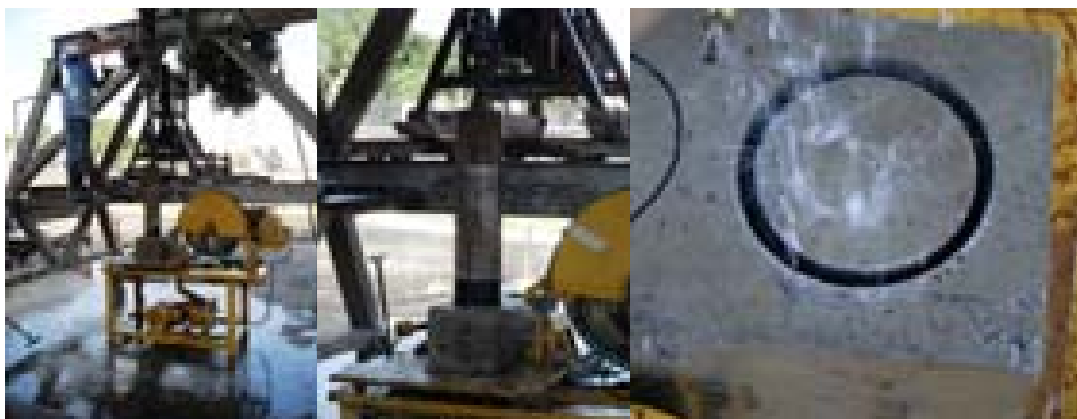


Figura 3.11 – Processo de extração dos corpos-de-prova cilíndricos do concreto, dos protótipos de viga.

Os protótipos de viga dos quais foram extraídos os corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura referem-se aos ensaios de penetrabilidade de cloretos, ensaio de migração (regime não estacionário) e porosidade. Já o protótipo de viga de onde foram extraídos os cilindros de concreto de dimensões 15 cm x 20 cm (diâmetro x altura), refere-se ao ensaio de penetração de água sob pressão. A Figura 3.12 destaca os protótipos de viga, bem como os locais e dimensões dos testemunhos extraídos.

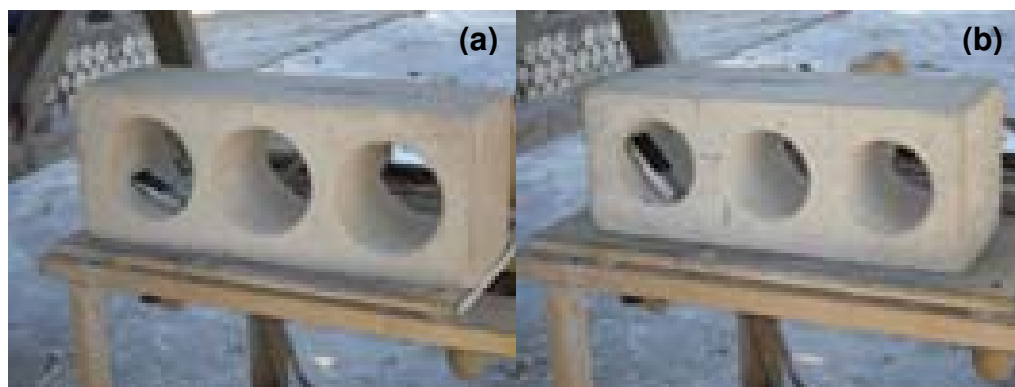


Figura 3.12 – Protótipos de viga após a extração de corpos-de-prova cilíndricos : (a) protótipo de 20 cm x 25 cm x 65 cm de dimensão (b) protótipo de 20 cm x 20 cm x 52 cm de dimensão.

Cabe destacar, que as extrações foram feitas de maneira perpendicular às faces de maior área do protótipo de viga, as quais tiveram contato com a fôrma. Isto foi necessário, para que pudesse ensaiar a região do cobrimento, com suas características superficiais influenciadas, principalmente, pelo efeito parede e, também, pela absorção da fôrma de madeira; tendo assim, uma avaliação de forma aproximada do cobrimento de uma viga em situação real.

Por fim, é importante salientar que os ensaios que utilizaram os testemunhos cilíndricos extraídos a partir de um protótipo de viga, cada um deles, aproveitou os testemunhos cilíndricos de maneira particular, conforme será descrito no item 3.5. Já os ensaios de absorção capilar e permeabilidade ao ar que não utilizaram testemunhos cilíndricos, também, tiveram uma forma peculiar de aproveitar o protótipo de viga.

### 3.5 MÉTODOS

Nesta dissertação as metodologias adotadas foram organizadas de acordo com as várias etapas da pesquisa, assim sendo, têm-se, a seguir apresentadas, as metodologias empregadas para a caracterização do concreto estado endurecido e, também, na avaliação de propriedades ligadas aos mecanismos de transporte de massa.

#### 3.5.1 Propriedades e características do concreto no estado endurecido

Os ensaios e estudos realizados para a avaliação de propriedades mecânicas e de características físicas do concreto no estado endurecido foram a resistência à compressão e a análise da porosidade por meio do ensaio de absorção em água por imersão, com aplicação de vácuo. De modo a caracterizar a condição de carbonatação natural dos corpos-de-prova antes da realização dos diversos ensaios da pesquisa, especialmente aqueles

relacionados aos mecanismos de transporte, avaliou-se a frente de carbonatação em todos os concretos por meio do uso de indicadores de pH. do concreto no estado endurecido foram a resistência à compressão, porosidade do concreto e medidas de carbonatação.

### 3.5.1.1 Resistência à compressão

No estado endurecido, os concretos foram caracterizados nas idades de 7, 28, 56, 91 e 126 dias quanto à resistência à compressão (ABNT NBR 5739, 2007), utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 10 cm x 20 cm.

A Figura 3.13 mostra a prensa utilizada para realização do ensaio de resistência à compressão.



Figura 3.13 – Realização do ensaio de resistência à compressão.

### 3.5.1.2 Porosidade do concreto

Ao se estudar os mecanismos de transporte, é de extrema importância que se tenha a caracterização do concreto frente à sua porosidade. Desse modo, empregou-se um método de ensaio visando determinar a porosidade acessível à água, prescrito pelo procedimento francês da AFPC – AFREM – DURABILITÉ DES BÉTONS e conhecido como : Determination de La Massa Volumique Apparente et de la Porosidade Accessible à L'eau.

Para esse ensaio, foram aproveitados os mesmos protótipos de viga ensaiados quanto à permeabilidade ao ar, extraíndo-se deles corpos-de-prova cilíndricos para serem submetidos ao ensaio de porosidade. Portanto, procedeu-se a extração dos cilindros de concreto conforme relatado no item 3.4.2; com isso, a partir de um corpo-de-prova de dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, retirou-se, mediante corte transversal do cilindro, uma amostra de 10 cm de diâmetro e 5 cm de espessura referente ao cobrimento. Em relação a esta amostra do cobrimento para o ensaio de porosidade, tomou-se o cuidado de defini-la

sempre na extremidade do corpo-de-prova cilíndrico oposta à extremidade em que se realizou o ensaio de permeabilidade ao ar (na qual havia um pequeno furo, necessário à realização deste ensaio, conforme descrição no subitem 3.5.2.4). Já o restante do cilindro, com dimensões de 10 cm de diâmetro e 15 cm de altura, foi destinado à determinação da altura capilar<sup>4</sup>, que serviu para completar a caracterização da porosidade do concreto, já que altura capilar é considerada um parâmetro importante para a obtenção do raio médio dos poros do concreto. A face que foi submetida à análise da altura capilar refere-se à parte do cobrimento, onde se tinha o furo do ensaio de permeabilidade ao ar. A Figura 3.14 mostra o esquema de aproveitamento do cilindro de concreto extraído para o ensaio de porosidade e para a obtenção da altura capilar.

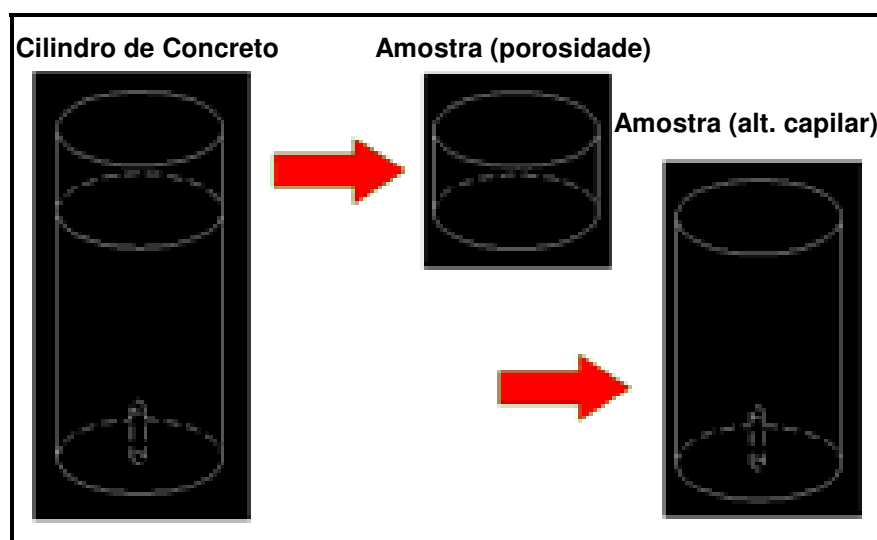


Figura 3.14 – Esquema de aproveitamento do cilindro extraído para o ensaio de porosidade e para a obtenção da altura capilar.

Para cada protótipo de viga, obtiveram-se três amostras, tanto para o ensaio de porosidade quanto para verificar a altura capilar.

Voltando o foco exclusivamente para o ensaio de porosidade, sua realização constituiu-se das seguintes etapas:

- Primeiramente, determinou-se a massa da amostra ao ar e secou-se em estufa à temperatura de  $(105\pm 5)$  °C, até constância de massa;
- Coletou-se a massa seca ( $m_{\text{sec}}$ ) em gramas (g), assim que a amostra de concreto atingiu a temperatura de  $(23\pm 2)$  °C;

<sup>4</sup> Altura capilar – detalhes sobre o procedimento de obtenção de altura capilar deste trabalho encontram-se no subitem 3.5.2.1.

- Colocou-se a amostra num dessecador (Figura 3.15-a), de tal forma, que este recipiente conferisse uma vedação adequada, para que a amostra fosse submetida à vácuo
- Submeteu-se a amostra a um vácuo de 25 mbars durante quatro horas e quinze minutos, sendo que depois de decorridas quatro horas, ela foi submersa em água deionizada, permanecendo nessa condição por  $(20 \pm 1)$  horas;
- Em seguida, retirou-se a amostra do dessecador e coletou-se a sua massa após saturação ( $m_{sat}$ ) e a massa submersa ( $m_{hidro}$ ) por meio de balança hidrostática. Na Figura 3.15, são destacadas algumas etapas do ensaio de porosidade.

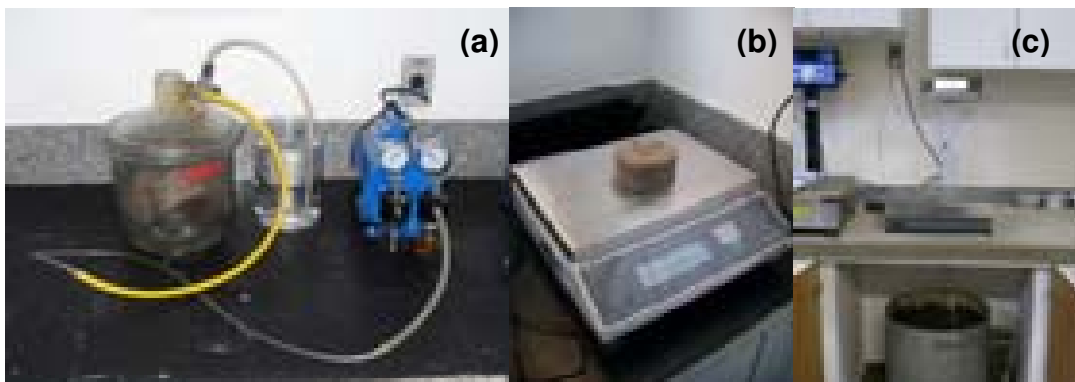


Figura 3.15 – Ensaio de porosidade: (a) saturação das amostras, (b) coleta da massa da amostra, (c) coleta da massa hidrostática.

De posse dos resultados referente às diferentes massas de cada amostra, a porosidade acessível a água é obtida, conforme a Equação 3.1. Os resultados apresentados são, preferencialmente, a média de 3 determinações

$$\mathcal{E} = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{m_{sat} - m_{hidro}} \quad (3.1)$$

onde:

$\mathcal{E}$  = porosidade acessível a água (%);

$m_{sat}$  = massa referente a saturação a vácuo (g);

$m_{sec}$  = massa seca em estufa, em g;

$m_{hidro}$  = massa da amostra submersa, obtida por balança hidrostática, em g.

### 3.5.1.3 Medidas de carbonatação

Determinou-se a frente (espessura) de carbonatação de todos os concretos, com o intuito, de caracterizá-los frente à carbonatação natural, uma vez que esse fenômeno não se constituiu em um aspecto controlado dentro do experimento global, apenas tendo sido

avaliado seu efeito de maneira restrita (para os concretos de relação  $a/a_g$  igual a 0,55). Portanto, tornou-se importante conhecer a ordem de grandeza da espessura carbonatada no cobrimento dos concretos estudados. Utilizando-se solução à base de fenolftaleína<sup>5</sup> e seguindo o modo de preparação da solução para uma faixa de viragem de pH entre 8,3 e 10, conforme relatam Castro (2003) e Cascudo (2005), foi possível verificar a frente de carbonatação, de maneira que a região do concreto não carbonatada se apresentava com coloração vermelho carmim, indicando um meio essencialmente básico, conforme ilustra a Figura 3.16, enquanto que a região carbonatada mantinha a coloração normal do concreto (incolor).



Figura 3.16 – Processo de medida de carbonatação dos concretos.

O processo de verificação da frente de carbonatação, conforme mostra a Figura 3.16, consistiu da fratura das arestas de uma face lateral do corpo-de-prova (face de referência, onde foram executados os ensaios de mecanismos de transporte) e em seguida da aspersão do indicador de pH, sendo, então, mensurada a profundidade de carbonatação com auxílio de um paquímetro de precisão 0,05 mm. É importante salientar que seguiu-se, em linhas gerais, o procedimento da RILEM (1988), no entanto no que tange ao tempo de leitura para se obter a medida de profundidade de carbonatação, após aspersão do indicador a base de fenolftaleína, preferiu-se adotar a proposta de Castro (2003), o qual recomenda a medida de profundidade de carbonatação após 10 min de aspergir o indicador, pois ele obteve, de forma excelente, uma correlação da medida de carbonatação com relação ao tempo de leitura de 10 min e o tempo de leitura recomendado pela RILEM (1988) que é de 24 h. Considerando essa nova proposta, tornou-se mais ágil a determinação da profundidade de carbonatação.

<sup>5</sup> Solução de fenolftaleína (faixa de pH 8,3 – 10,0) – dissolver 10 g do reagente em 700 cm<sup>3</sup> de etanol e diluir em 300 cm<sup>3</sup> de água destilada (CASTRO, 2003; CASCUDO, 2005).

A determinação da frente de carbonatação foi realizada na idade de 84 dias do concreto, pois nessa idade os concretos foram submetidos aos ensaios de mecanismo de transporte de massa.

### 3.5.2 Ensaios que avaliaram as propriedades de transporte de massa

A seguir, estão descritos os métodos utilizados para avaliar os mecanismos de transporte de massa no concreto, a saber: absorção capilar, penetração de água sob pressão, permeabilidade ao ar (método de Figg), penetrabilidade de cloretos e o ensaio de migração (regime não estacionário). É importante ressaltar que os concretos foram submetidos aos ensaios citados, considerando-se uma única idade de referência, que foi a idade de 84 dias, sendo que o término para concluir duas situações (parte interna e cobrimento) de estudo, levava-se uma semana após a idade de referência. Adotou-se esta idade, por considerar que a hidratação do concreto está quase concluída, o que significa dizer, que a evolução da microestrutura do concreto está próxima da estabilização, tal afirmação, pode ser respaldada por meio dos resultados de resistência à compressão dos concretos nas idades de 91 e 126 dias apresentados no subitem 4.1.1, os quais demonstram valores bem próximos.

#### 3.5.2.1 Absorção capilar

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado conforme a ABNT NBR 9779:1995, com algumas adaptações. Para este fim, foram destinados dois protótipos de viga (sem armadura) para duas situações<sup>6</sup> de estudo, sendo que de cada protótipo foram obtidos três corpos-de-prova cúbicos de concreto de 20 cm de largura, 20 cm de altura e 17 cm de comprimento. Cada protótipo gerou dois cubos de concreto referentes ao cobrimento (cubos dos extremos) e um cubo referente à parte interna do concreto, como se observa na Figura 3.17. Em suma, para as duas situações, foram obtidos quatro cubos referente ao cobrimento e dois cubos referente à parte interna. Para os fins do ensaio desconsiderou-se um dos cubos referente à parte do cobrimento, ensaiando-se, dessa forma, cinco cubos para as duas situações de estudo. A Figura 3.17 mostra a maneira que obteve os cubos de concreto de um protótipo.

---

<sup>6</sup> Duas situações de estudo = 1 situação (tipo de concreto) x 1 situação (relação a/ag) x 2 situação (região do concreto).

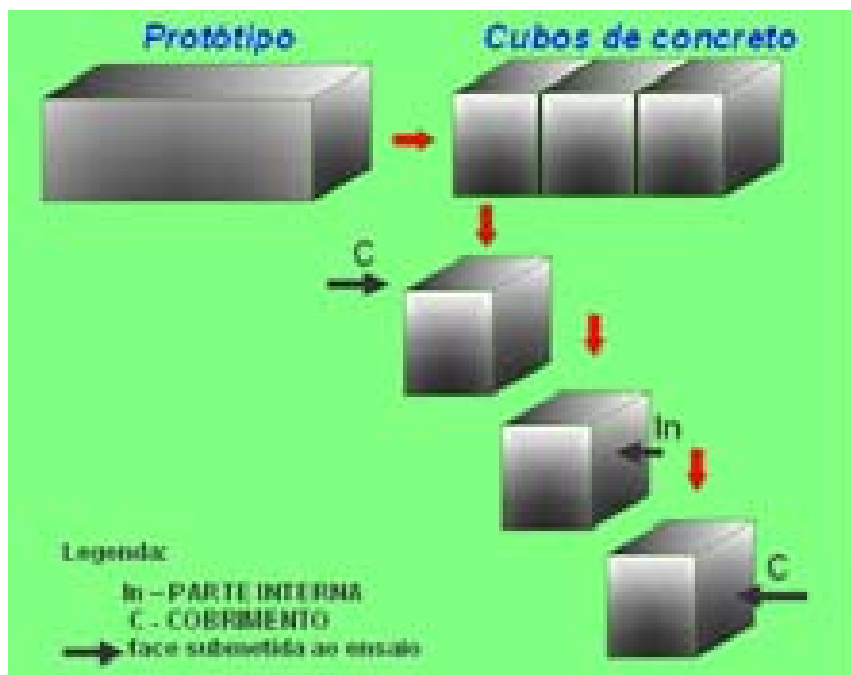


Figura 3.17 – Processo de obtenção dos cubos de concreto para o ensaio de absorção capilar.

O ensaio em questão consistiu nas seguintes etapas:

- Primeiramente, determinou-se as massas dos cubos de concreto ao ar e secou-se em estufa à temperatura de  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ , até constância de massa;
- Posicionou-se os cubos de concreto sobre suportes, colocando a face (parte interna ou cobrimento) de interesse voltada para baixo (em contato com a lâmina de água), preenchendo com água o recipiente de ensaio, de modo que o nível d'água permanecesse constante a  $(5 \pm 1)$  mm acima de sua face inferior, evitando a molhagem de outras superfícies;
- Durante o ensaio, determinou-se as massas dos corpos-de-prova de concreto com 24 h, 48 h e 72 h, contadas a partir da colocação deles em contato com a água. Estes devem ser previamente enxugados com pano úmido;

Por fim, calculou-se absorção de água por capilaridade através da seguinte Equação 3.2:

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (3.2)$$

onde:

C= absorção de água por capilaridade, em  $\text{g}/\text{cm}^2$ ;

A= massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, em g;

B= é a massa do corpo-de-prova seco, assim que este atingir a temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ , em g;

S= é a área da seção transversal do corpo-de-prova, em  $\text{cm}^2$ .

A Figura 3.18 apresenta as principais etapas do ensaio de absorção capilar.



Figura 3.18 – Ensaio de absorção por capilaridade:(a) corpos-de-prova cúbicos de concreto na estufa, (b) os cubos de concreto sendo submetidos ao ensaio, (c) coletando-se a massa da amostra.

Depois de realizada todas as situações de estudo, referente ao ensaio de absorção capilar, analisou-se a cinética de cada situação e verificou-se de maneira generalizada que a absorção capilar começa a perder sua velocidade de maneira acentuada a partir de 48 horas. Diante disso, tendo em vista, que a altura capilar é um parâmetro importante para se obter o raio médio dos poros e que não foi coletada no término de cada ensaio de absorção capilar, decidiu-se, a partir daí, obter altura capilar dos concretos por meio dos corpos-de-prova (protótipos) ensaiados de permeabilidade ao ar, conforme está ilustrado na Figura 3.14 e descrito no subitem 3.5.1.2, com a principal finalidade de complementar o estudo de porosidade, assim como, dar um melhor respaldo ao ensaio de absorção capilar e outras propriedades de transporte de massa.

Com os resultados de altura capilar dos concretos, por fim, foi possível se obter o raio médio dos poros de cada concreto. A Figura 3.19 ilustra o processo de obtenção da altura capilar dos concretos.



Figura 3.19 – Processo de obtenção da altura capilar através do ensaio de absorção capilar.

### 3.5.2.2 Penetração de água sob pressão

O ensaio de penetração de água sob pressão foi realizado conforme a ABNT NBR 10787:1994 com algumas adaptações. A preparação dos corpos-de-prova partiu dos cilindros de concreto extraídos de dimensões 15 cm x 20 cm (diâmetro x altura), os quais foram utilizados da maneira que está ilustrada na Figura 3.20. Observa-se, nesta figura, que o cilindro de concreto foi dividido ao meio na direção de sua base, aproveitando-se uma de suas metades; esta, por sua vez, foi dividida ao meio na direção de sua altura, sendo que uma dessas partes foi invertida e colada (usando-se adesivo à base de epóxi) na outra parte, de tal modo que se pudesse obter uma face que representasse o cobrimento e a outra a parte interna do concreto, ao mesmo tempo, em um corpo-de-prova de 15 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A Figura 3.20 detalha esquematicamente a preparação do corpo-de-prova para o ensaio de penetração de água sob pressão e a Figura 3.21 mostra o detalhe da colagem do corpo-de-prova.



Figura 3.20 – Processo de preparação dos corpos-de-prova para o ensaio de penetração de água sob pressão.



Figura 3.21 – Preparação do corpo-de-prova de penetração de água sob pressão: (a) detalhe da colagem, (b) detalhe do corpo-de-prova já colado.

Diante da necessidade de se obter resultados da parte interna e do cobrimento do concreto e tendo em vista que o aparelho do ensaio de penetração de água sob pressão só permite ensaiar 3 corpos-de-prova por semana, concebeu-se, então, o corpo-de-prova apresentado nas Figuras 3.20 e 3.21, de modo a viabilizar a realização do ensaio dentro do período de tempo previsto.

O ensaio consistiu, primeiramente, em colocar os 3 corpos-de-prova no aparato de penetração de água dotado de manômetro e reservatório de água. Em seguida, aplicou-se uma pressão de água na parte inferior dos corpos-de-prova (de baixo para cima) de  $(0,1 \pm 0,01)$  MPa, permanecendo assim durante 48 h; na seqüência, a pressão foi acrescida em mais duas faixas:  $(0,3 \pm 0,01)$  MPa e  $(0,7 \pm 0,01)$  MPa, respectivamente. Estas últimas faixas de pressão foram mantidas constantes por um período de 24 horas, cada. Após as 96 horas totais de ensaio, os corpos-de-prova foram retirados do equipamento e levados à sala de prensas para serem rompidos diametralmente, de forma a realizar a leitura das alturas de penetração de água. Na Figura 3.22 pode-se observar o equipamento e na Figura 3.23 tem-se a coleta de medidas do ensaio de penetração de água.



Figura 3.22 – Detalhe do aparato de ensaio do método de penetração de água sob pressão.



Figura 3.23 – Coletas de medidas de penetração de água.

### 3.5.2.3 Permeabilidade ao ar

O ensaio de permeabilidade ao ar foi realizado conforme o Método de Figg, tomando-se como base as propostas de Figg (1973), Cather *et al.* (1984) e LNEC E413(1993). O contexto deste método já foi descrito no subitem 2.2.1.1-b. A partir disso, no presente estudo, decidiu-se utilizar o protótipo de dimensões 20 cm de largura, 20 cm de altura e 52 cm de comprimento, no qual se fez quatro furos numa mesma linha e distantes um do outro, aproximadamente, 10 cm, conforme mostrado na Figura 3.24. Adotou-se o furo de 6 mm de diâmetro e 40 mm de profundidade, contrariando o recomendado pelo Cather *et al.* (1984), mas respaldado pelo LNEC E413 (1993), que ressalta a possibilidade de executar diâmetros diferentes.

Antes de realizar o ensaio, conservou-se o corpo-de-prova durante 3 dias no ambiente de realização de ensaio, no qual a temperatura ficou em torno de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  e a umidade relativa  $(60 \pm 6)\%$ .

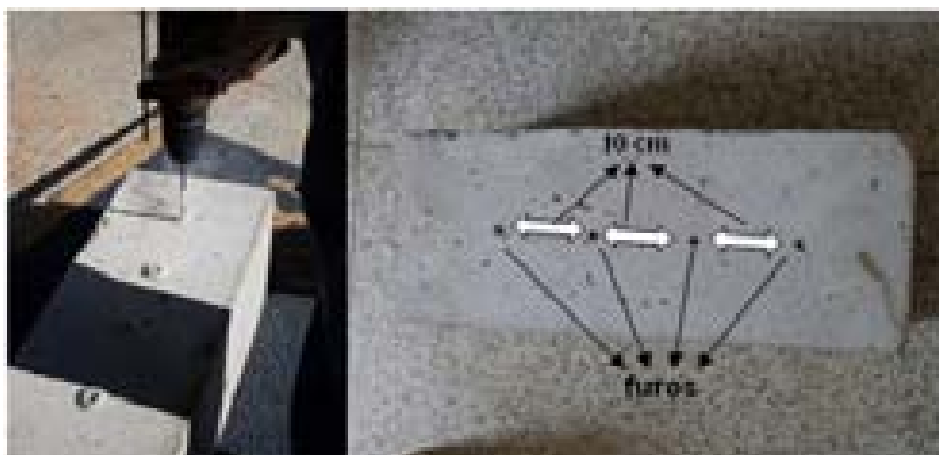


Figura 3.24 – Execução dos furos para preparação do ensaio de permeabilidade ao ar.

Para se aplicar o vácuo nos furos, inicialmente foi necessário prepará-los da seguinte maneira:

- Removeu-se o pó de dentro de cada furo soprando-se um jato de ar;
- Vedou-se a abertura de cada furo com uma rolha de borracha (com agulha, conforme a Figura 3.25) cortada de um anel de vedação usado em tubos de esgoto. A rolha media 5 mm de espessura e, para melhorar sua aderência à parede lateral do furo, aplicou-se silicone em sua superfície lateral;
- Sabendo-se que a rolha de borracha (com agulha) tem uma espessura de 5 mm, esta foi colocada a uma profundidade de 15 mm com auxílio de um “arame” com dimensão conhecida, o qual tinha a principal função de empurrar a rolha de borracha até a profundidade desejada, a fim de se obter uma vedação de 20 mm no total;
- Preencheu-se de silicone o furo até a superfície do corpo-de-prova, a partir da rolha de borracha;
- Após a inserção das agulhas nos furos, com o sistema de vedação concretizada conforme a Figura 3.26, esperou-se no mínimo 24 horas para se dar início ao ensaio.



Figura 3.25 – Preparação dos furos para execução do ensaio permeabilidade ao ar.

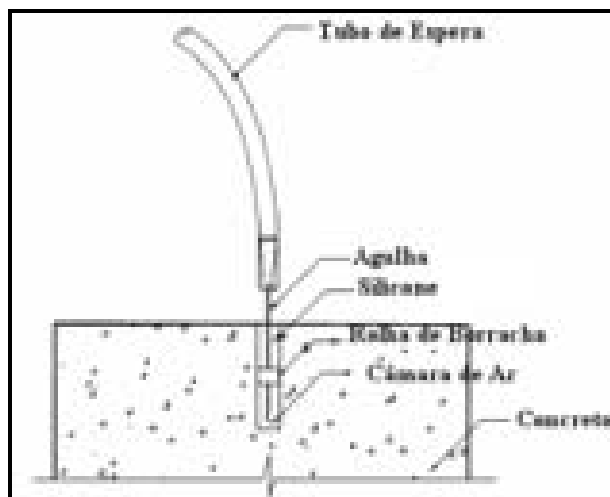


Figura 3.26 – Sistema de vedação e disposição da agulha no furo.

Com os furos preparados, iniciou-se o ensaio da seguinte forma:

- Inseriu-se a mangueira ligada à bomba de vácuo no tubo de espera de um dos furos preparados no corpo-de-prova;
- Acionou-se a bomba de vácuo (com a válvula do vacuômetro aberta) e aguardou-se que o vacuômetro medisse a menor pressão possível;
- Fechou-se a válvula do vacuômetro, em seguida, desligou-se a bomba;
- Abriu-se um pouco a válvula para que a pressão se elevasse até um valor próximo a -55KPa(-412,5 mmHg). Daí iniciou-se a cronometragem;
- Encerrou-se a medição do tempo (término da cronometragem), quando o vacuômetro indicou a pressão de -50KPa(-375 mmHg);
- Repetiu-se os dois últimos passos, caso a diferença entre os tempos de permeabilidade tivesse um valor maior, em módulo, a 2%;
- Depois de completado a medição do tempo de permeabilidade ao ar dos quatro furos contidos no protótipo de viga, fez-se a média dos tempos de permeabilidade dos furos, sendo, portanto, considerado o resultado final do ensaio.

Na Figura 3.27, ilustra-se o ensaio de permeabilidade ao ar sendo executado.

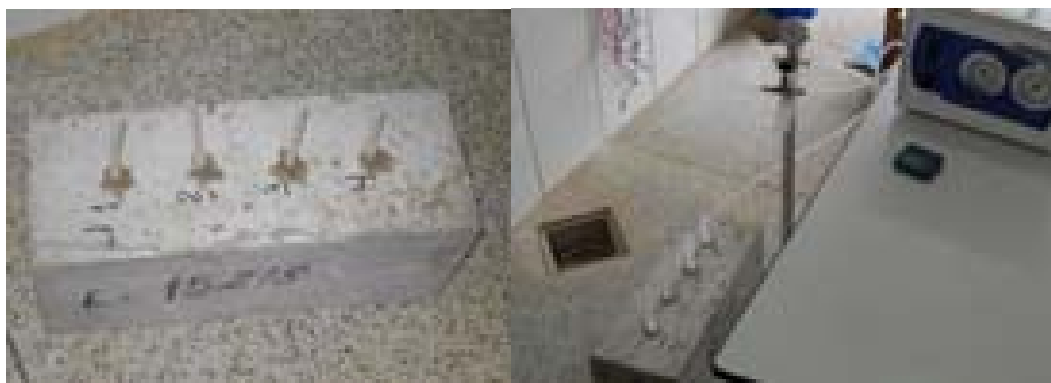


Figura 3.27 –Ensaio de permeabilidade ao ar.

### 3.5.2.4 Penetrabilidade de cloretos

A determinação da penetrabilidade de cloretos no concreto foi realizada de acordo com o prescrito na ASTM C 1202: 2009. Cumprindo a premissa de avaliar o cobrimento e a parte interna do concreto, a partir de um cilindro de concreto de dimensões 10 cm x 20cm (diâmetro x altura), foi possível obter duas amostras de 10 cm de diâmetro e 5 cm de espessura (uma amostra para cada uma das duas partes citadas), conforme mostra a Figura 3.28. A cor preta na ilustração do cilindro de concreto da Figura 3.28 refere-se às partes que foram descartadas.

Então, obtiveram-se três amostras para avaliar a parte interna e três amostras para avaliar o cobrimento do concreto, somando-se seis amostras no total, as quais provieram de três cilindros de concreto extraídos. É importante ressaltar que esta metodologia para obtenção de amostras para ensaio foi utilizada, também, para o ensaio de migração (regime não estacionário).



Figura 3.28 –Esquema de aproveitamento do cilindro de concreto para o ensaio de penetrabilidade de cloretos e, também, para o ensaio de migração em regime não estacionário.

Antes de realizar o ensaio, selou-se a superfície lateral da amostra com resina epóxi. Depois da secagem da resina, procedeu-se à saturação em água a vácuo. Primeiramente, a amostra foi submetida a vácuo por quatro horas, sendo que depois de decorridas três horas ela foi submersa em água deionizada, permanecendo nessa condição por 19 horas. A partir daí, a amostra foi fixada às semicélulas por meio de borracha de silicone. Após o silicone conferir uma resistência e vedação adequadas, colocou-se uma solução de hidróxido de sódio a 0,3 N em uma semicélula e na outra colocou-se uma solução de cloreto de sódio a 3% de concentração, em massa. O conjunto das semicélulas de acrílico e o corpo-de-prova constituíram a célula de penetração de cloretos, como se vê na Figura 3.29-b.

Entre as semicélulas foi gerada uma diferença de potencial de 60 V (corrente contínua), dando origem a uma corrente elétrica que induziu o ânion cloreto a migrar através do concreto sob a ação de um campo elétrico. O ensaio teve a duração de seis horas e a corrente elétrica passante foi registrada em intervalos de trinta minutos. O somatório (integral) do produto da corrente pelo tempo resulta na carga total que atravessou o corpo-de-prova.

O resultado da carga total passante, em Coulomb, representa a maior ou menor resistência do concreto à penetração de cloretos. Os ensaios foram realizados em ambiente climatizado com temperatura de  $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $(60 \pm 5)\%$ . A Figura 3.29 destaca o ensaio de penetrabilidade de cloretos sendo executado.

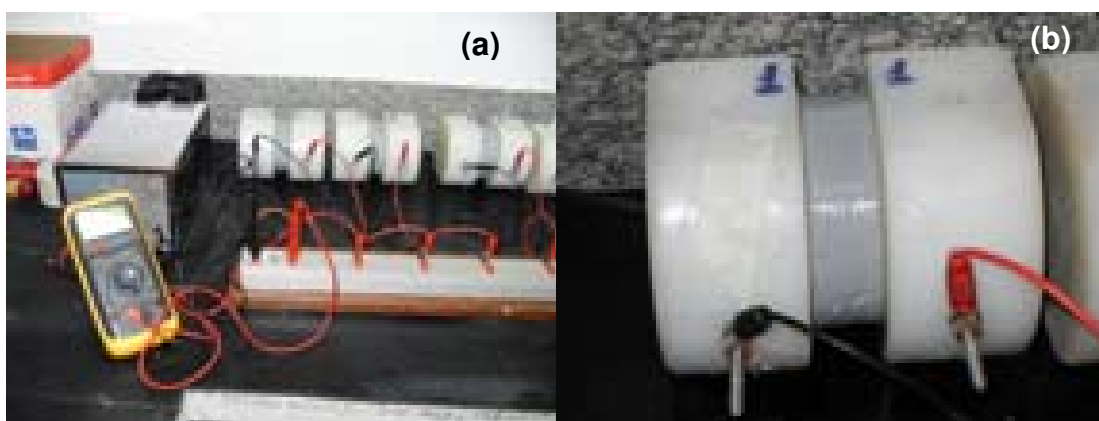


Figura 3.29 – (a) Ensaio de penetrabilidade de cloretos sendo executado; (b) detalhe da célula do ensaio de penetrabilidade de cloretos.

### 3.5.2.5 Ensaio de migração (regime não estacionário)

O ensaio adotado para avaliar a migração em regime não estacionário foi conforme a norma NT BUILD 492:1999, que se baseia na proposta de Tang e Nilsson (1992) e sugere uma

equação matemática para se obter o coeficiente de difusão. O termo coeficiente de difusão foi usado no presente trabalho, a despeito do transporte de cloretos ocorrer principalmente por migração elétrica, pelo fato de que muitos autores assim o consideram, tanto para o mecanismo de migração quanto para difusão. Para realização desse ensaio, no que se refere ao aproveitamento dos corpos-de-prova cilíndricos de concreto, adotou-se o mesmo procedimento descrito para o ensaio de penetrabilidade de cloretos, inclusive as quantidades e as dimensões das amostras, conforme especificações constantes no subitem 3.2.2.4.

O aparato de ensaio foi, então, montado, cujo detalhamento se encontra na Figura 3.30.

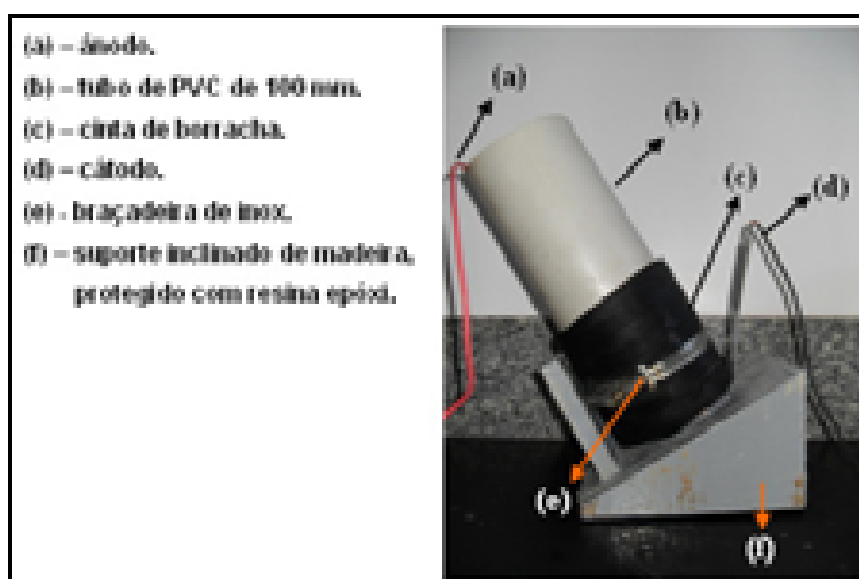


Figura 3.30 – Proposta de esquema de ensaio de migração (regime não estacionário), que foi elaborada e utilizada no presente estudo.

Antes de ensaiar, inicialmente saturou-se a amostra de maneira semelhante ao ensaio de penetrabilidade de cloretos, no entanto não houve necessidade de selar a superfície lateral com resina epóxi. Em seguida, colocou-se a amostra dentro da cinta de borracha (Figura 3.31-a), selando-a com silicone em todo o seu perímetro lateral (Figura 3.31-b), tanto na parte superior como na parte inferior. A Figura 3.31 apresenta partes da preparação do ensaio de migração (regime não estacionário), no que diz respeito à vedação do aparato de ensaio.

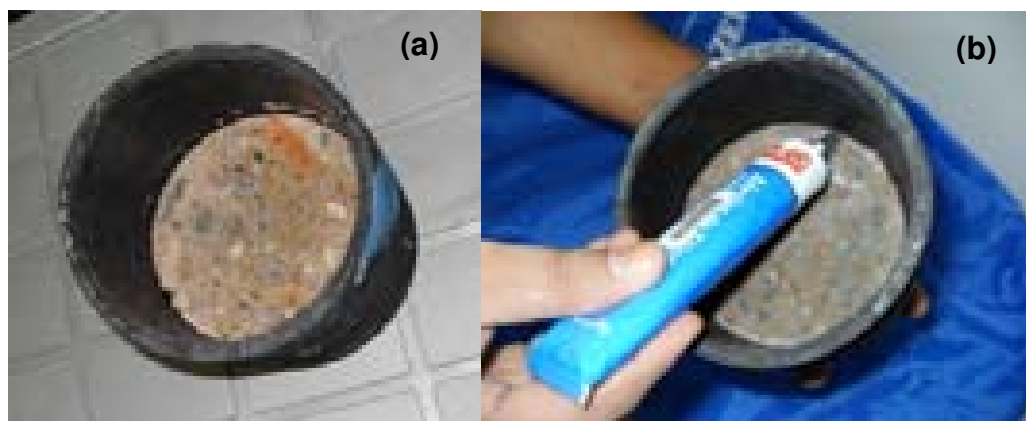


Figura 3.31 – Preparação do ensaio de migração (regime não estacionário): (a) amostra inserida na cinta de borracha e, (b) selando o perímetro superior da amostra junto à cinta.

Depois de verificado que o sistema estava bem vedado, encaixou-se o segmento de tubo de PVC de 100 mm de diâmetro dentro da cinta de borracha, apertando o conjunto com uma braçadeira, formando assim um “copo”, como apresentado na Figura 3.32. Logo em seguida, colocou-se uma solução anódica de 300 ml de NaOH (hidróxido de sódio) a 0,3 N no “copo” (Figura 3.34), ou seja, sobre a amostra; já na parte inferior (Figura 3.34) que corresponde à solução catódica, preparou-se uma solução de 10% de NaCl (cloreto de sódio), em massa, em relação à água destilada ou deionizada, correspondendo a 17 litros de solução. Por fim, foram posicionados os eletrodos na parte superior (colocou-se o ânodo) e inferior (colocou-se o cátodo), na Figura 3.33, apresenta-se os eletrodos utilizados nesse ensaio. Aplicou-se, na sequência, uma diferença de potencial, inicialmente, de 30V (para coletar a primeira medida de corrente). Com base nesse valor de corrente inicial, verificou-se se havia necessidade de ajustar a diferença de potencial. Isto foi feito por meio de uma tabela que se encontra na norma NT BUILD 492:1999 (presente no Anexo A) que, em função da corrente inicial, vincula a diferença de potencial com o tempo de ensaio. Observa-se no Anexo A que a diferença de potencial pode variar de 10 V a 60 V e o tempo de ensaio pode variar de 6 horas a 96 horas, parâmetros que dependem da resistividade do concreto. As Figuras 3.32, 3.33 e 3.34 ilustram algumas partes da preparação do ensaio.



Figura 3.32 – Detalhe da junção da cinta de borracha com o tubo de PVC, formando um “copo” para solução anódica.

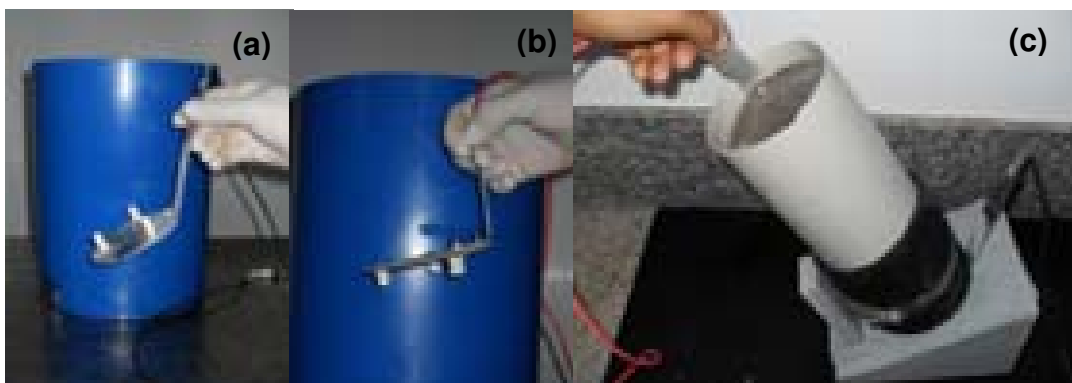


Figura 3.33 – Apresentação dos eletrodos: (a) ânodo; (b) cátodo e (c) ilustração do posicionamento dos eletrodos.

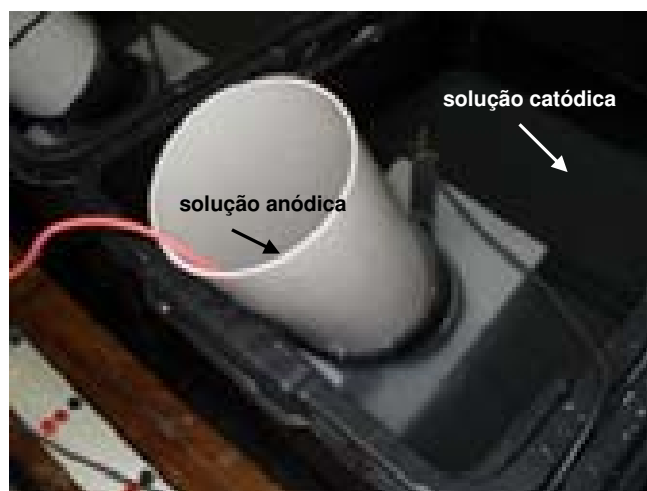


Figura 3.34 – Ilustração das posições das diferentes soluções.

Decorrido o tempo de ensaio, retirou-se a amostra do aparato de ensaio e promoveu-se sua ruptura; em seguida, aspergiu-se em seu interior uma solução de 0,1 M de nitrato de prata

em água deionizada, conforme a norma NT BUILD 492:1999, sendo que essa concentração de solução de nitrato de prata é considerada por Otsuki *et al* (1992 apud JUCÁ, 2003) a ideal para se notar a mudança de coloração propiciada pela presença de cloretos livres. Após 15 min de ter aspergido a solução, coletaram-se várias medidas no decorrer da seção da amostra (considerando a parte esbranquiçada) e obteve-se uma média dos valores medidos chegando no resultado de  $x_d$ . Este foi o principal parâmetro de entrada na Equação 3.3, proposta pela referida norma, sendo necessário para a obtenção do coeficiente de difusão do concreto. Os ensaios foram realizados em ambiente climatizado com temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $(60 \pm 5)\%$ .

$$D = \frac{0.0279(273 + T)L}{(U - 2)t} \left( x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (3.3)$$

onde:

D= coeficiente de difusão no regime não estacionário, ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s);

U= valor da diferença de potencial do campo elétrico (V);

T= valor médio da temperatura inicial e final da solução anódica, ( $^\circ\text{C}$ );

L= espessura do corpo-de-prova, (mm);

$x_d$ = valor médio da penetração de cloretos, (mm);

t= duração do ensaio, (horas).

A Figura 3.35 ressalta o ensaio de migração (regime não estacionário) de cloretos, no momento da medida da penetração do cloreto (obtenção do parâmetro  $x_d$ ). Pode-se observar claramente, nas duas fotografias de baixo, a frente de cloretos dada pela espessura esbranquiçada.

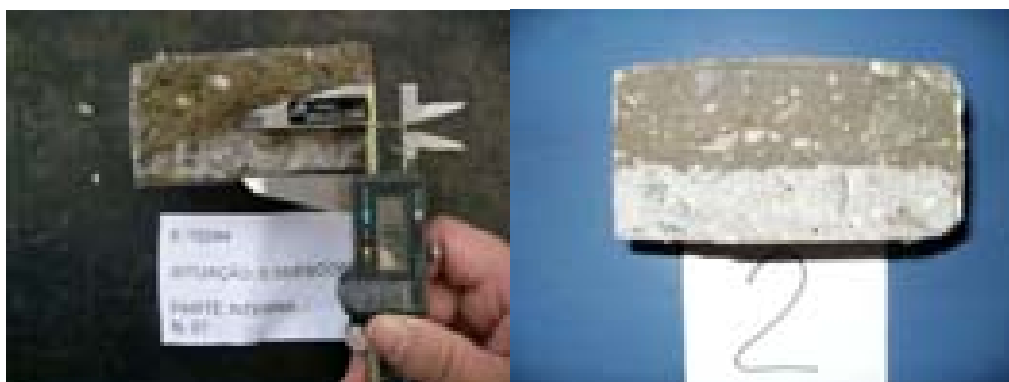


Figura 3.35 – Detalhe da medida e nitidez que a solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) confere ao indicar a frente de ingresso de cloretos no concreto.

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

No presente capítulo estão apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. Inicialmente se tem o item relativo às características e propriedades do concreto no estado endurecido, no qual são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão e porosidade acessível à água, sendo que esta foi complementada com resultados de altura capilar e raio médio dos poros; por fim, neste mesmo item, estão apresentados os resultados no tocante à avaliação da profundidade da carbonatação. Em seguida, é apresentada a avaliação das variáveis consideradas neste estudo, frente aos mecanismos de transporte de massa que, por sua vez, foram avaliados por meio dos seguintes ensaios: absorção capilar, permeabilidade ao ar, penetração de água sob pressão, penetrabilidade de cloretos e ensaio de migração de cloretos em regime não estacionário. Cabe salientar que os resultados individuais de diferentes propriedades avaliadas foram submetidos a uma análise estatística de variância, com a principal finalidade de dar um melhor respaldo às análises e discussões realizadas.

## 4.1 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

A caracterização do concreto no estado endurecido envolveu a determinação da resistência à compressão, porosidade acessível à água, obtenção da altura capilar para determinação do raio médio dos poros e determinação da profundidade de carbonatação.

### 4.1.1 Resistência a compressão

Na Tabela 4.1 estão apresentados os resultados médios dos ensaios de resistência à compressão para as idades de 7, 28, 56, 91 e 126 dias. Os resultados individuais são mostrados no Anexo C.

Tabela 4.1 – Resultados médios de resistência à compressão.

Concreto	Teor de adição (%)	a/ag	Resistência à compressão média (MPa)				
			7 dias	28 dias	56 dias	91 dias	126 dias
Referência	0	0,35	47,20	50,15	52,96	54,82	55,12
		0,45	34,79	43,44	48,27	45,51	49,09
		0,55	22,57	29,28	29,65	33,85	33,62
		0,55*	20,28	25,03	26,85	26,97	30,23
Sílica Ativa	10	0,35	36,25	50,09	57,26	64,48	67,2
		0,45	39,50	47,17	57,83	56,86	55,84
		0,55	22,76	38,33	42,55	44,34	45,06
		0,55*	ND	ND	ND	ND	ND
Escória de Alto-forno	50	0,35	34,92	43,93	52,45	57,90	56,68
		0,45	26,29	33,96	41,71	47,38	48,64
		0,55	19,68	33,54	42,83	39,68	40,13
		0,55*	19,53	28,25	36,26	41,13	38,06

\*não carbonatado

As resistências à compressão mais elevadas foram obtidas pelos concretos com adição de sílica ativa (67,2 MPa). Este resultado é esperado e é fruto da ação pozolânica e do efeito fíler proporcionados pela sílica ativa, que altera a estrutura física da pasta de cimento, refinando poros, densificando a estrutura interna do concreto e melhorando consideravelmente a interface pasta-agregado, conforme discutidos por vários autores (METHA; MONTEIRO. 1994; NEVILLE, 1997; AITCIN, 2000).

Os concretos com adição de escória de alto-forno apresentaram, em geral, resultados semelhantes aos concretos de referência, exceto para as idades iniciais (7 e 28 dias), pois como a escória tem menor reatividade que o clínquer de cimento Portland nas primeiras idades, as resistências são relativamente menores em comparação aos concretos de referência. Contudo, as resistências dos concretos com escória são equiparadas em idades

intermediárias às resistências dos concretos de referência, chegando inclusive a apresentar resultados mais altos nas últimas idades.

Observa-se que o comportamento geral dos concretos seguiu em conformidade à lei de Abrams, segundo a qual o aumento da relação água/aglomerante resulta em menor resistência à compressão. Conforme Mehta e Monteiro (1994), isto pode ser explicado como uma conseqüência natural do progressivo enfraquecimento da matriz (pasta hidratada), em virtude do aumento da porosidade gerada pelo aumento da relação a/ag.

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os resultados de resistência à compressão em função da idade (resultados médios presentes na Tabela 4.1), respectivamente para as relações água/aglomerante 0,35; 0,45 e 0,55.

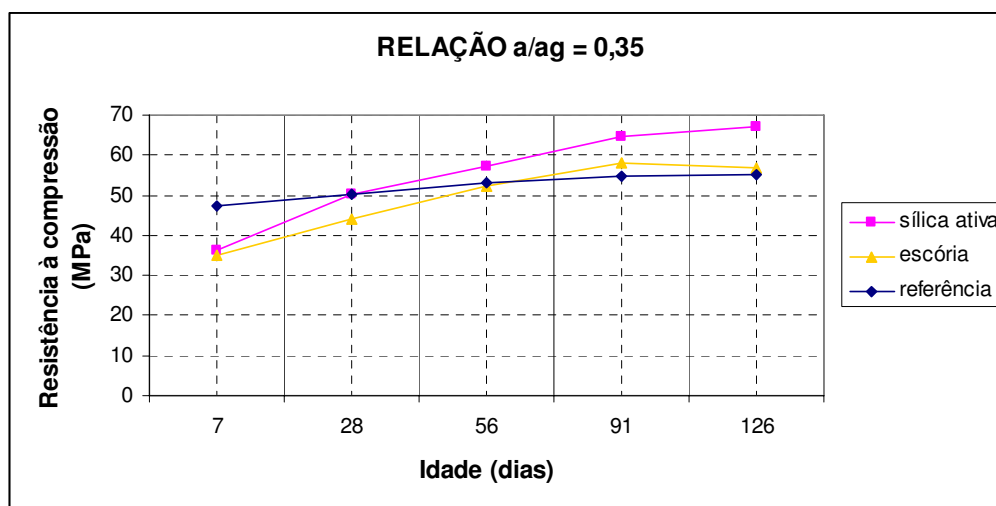


Figura 4.1 – Valores médios de resistência à compressão em função do tipo de concreto (adição mineral) referente a relação água/aglomerante 0,35.

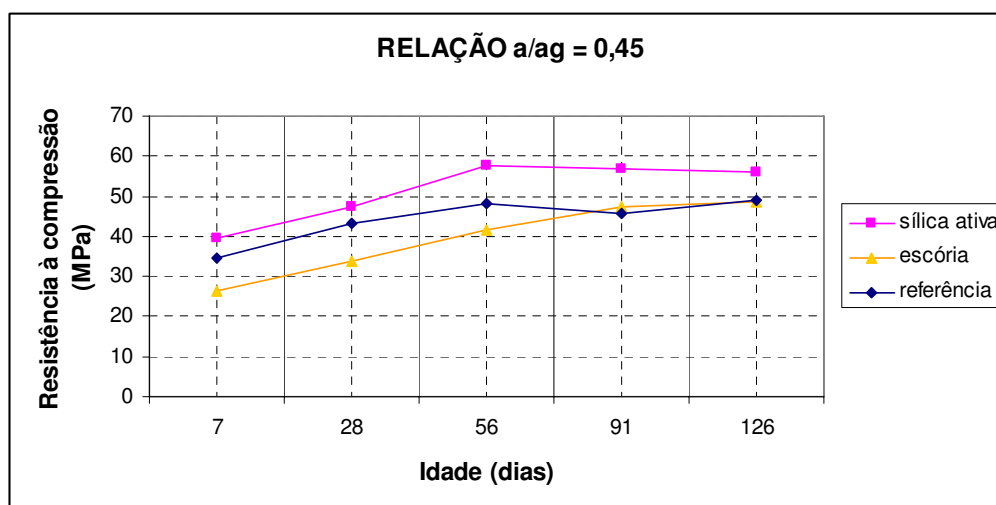


Figura 4.2 – Valores médios de resistência à compressão em função do tipo de concreto (adição mineral) referente a relação água/aglomerante 0,45.

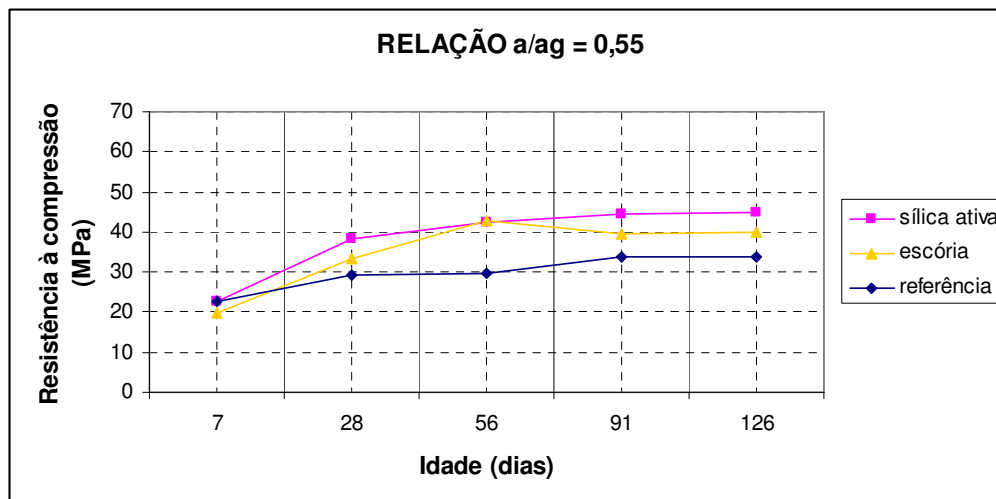


Figura 4.3 – Valores médios de resistência à compressão em função do tipo de concreto (adição mineral) referente a relação água/aglomerante 0,55.

#### 4.1.2 Porosidade do concreto

Na Tabela 4.2 estão apresentados os resultados médios dos ensaios de porosidade acessível à água após a idade de 84 dias, referente aos concretos estudados no estudo. Os resultados individuais estão apresentados no Anexo C.

Tabela 4.2 – Resultados médios da porosidade acessível à água do concreto.

Concreto	Teor de adição(%)	a/ag	Porosidade do concreto
			(%)
Referência	0	0,35	12,49
		0,45	12,96
		0,55	14,33
		0,55*	14,46
Sílica	10	0,35	13,58
		0,45	14,03
		0,55	15,62
		0,55*	15,32
Escória de Alto-forno	50	0,35	13,51
		0,45	14,51
		0,55	15,15
		0,55*	15,52

\*não carbonatado

O menor valor de porosidade acessível à água foi de 12,49%, obtido pelo concreto sem adição (referência). Analisando de maneira geral, os concretos com adição mineral apresentaram maiores porosidades quando comparados com concretos sem adição. Tal comportamento é verificado na Figuras 4.4 .

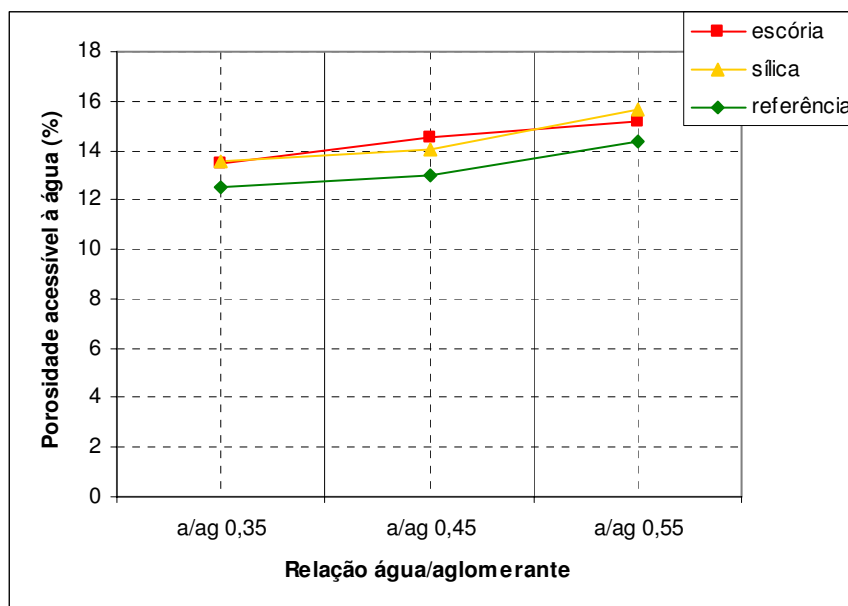


Figura 4.4 – Valores médios de porosidade acessível à água para cada tipo de concreto em função da relação a/ag.

O fato dos concretos com adições apresentarem uma porosidade acessível à água maior que os concretos sem adição pode ter uma explicação, conforme Sato (1998), no fato da pasta de concretos com adição apresentar um maior volume total de poros que, por sua vez, é consequência da formação de maior quantidade de C-S-H na pasta (matriz cimentícia).

Sato (1998) constatou que os concretos com escória apresentaram uma porosidade total maior quando comparados com concretos sem adição (referência), o mesmo tendo sido verificado por John (1995), no entanto observa-se, em ambos os trabalhos, que houve um refinamento e descontinuidade dos poros. Nesse sentido, deve-se tomar cuidado quanto à avaliação isolada da porosidade pois, segundo Neville (1997), se a porosidade obtida pela absorção de água resulta em um valor elevado e se os poros estiverem interligados, haverá, neste caso, contribuição para o deslocamento de fluidos através do concreto, de modo que a permeabilidade também passa a ser alta; por outro lado, se os poros forem descontínuos, portanto ineficazes para o deslocamento de fluidos, a permeabilidade do concreto será baixa, mesmo com uma porosidade total mais alta.

Concernente à influência da relação a/ag no valor da porosidade acessível à água, há a constatação clássica de aumento da porosidade com o aumento da relação a/ag, conforme se tem na Figura 4.4. Tal comportamento é absolutamente esperado, pois é condizente com a Lei de Abrams e com as teorias de Powers (1956 *apud* HELENE, 1993), em que o aumento da relação a/c implica no aumento da porosidade da pasta de cimento e, conseqüentemente, no acréscimo do índice de vazios do concreto, o que reduz resistência

mecânica. Aitcin (2000) explica que a redução da relação a/ag propicia que as partículas de cimento fiquem mais próximas umas das outras na pasta de cimento fresca, contribuindo para que as reações de hidratação do cimento ocorram de tal maneira que a estrutura se feche mais rapidamente, com cristais menores, resultando em um concreto menos poroso.

#### 4.1.2.1 Altura capilar/Raio médio

Na Tabela 4.3 estão apresentados os resultados médios de altura capilar e o raio médio dos poros dos concretos estudados, sendo que os resultados de raio médio foram determinados a partir dos resultados de altura capilar, conforme a Equação 2.13 descrita no subitem 2.2.2.

Tabela 4.3 – Resultados médios de altura capilar e raio médio dos poros do concreto.

Concreto	Teor de adição(%)	a/ag	Altura capilar	Raio médio
			(mm)	(mm)
Referência	0	0,35	75,15	2,26 E-06
		0,45	67,51	1,83 E-06
		0,55	81,13	2,65 E-06
		0,55*	73,92	2,20 E-06
Sílica	10	0,35	40,09	6,46 E-07
		0,45	42,69	7,33 E-07
		0,55	52,25	1,10 E-06
		0,55*	61,80	1,53 E-06
Escória de Alto-forno	50	0,35	42,41	7,23 E-07
		0,45	47,24	8,97 E-07
		0,55	45,02	8,14 E-07
		0,55*	52,04	1,09 E-06

\*não carbonatado

Observa-se que tanto os resultados médios de altura capilar quanto o raio médio dos poros são maiores para os concretos sem adição (referência), quando comparados com os concretos com adição.

Com intuito de verificar se as variáveis envolvidas influenciaram de maneira significativa o raio médio dos poros, realizou-se uma análise estatística de variância (ANOVA) que, por sua vez, os seus resultados encontram-se na Tabela 4.4, onde os valores de “F calculados” ( $F_{cal}$ ) foram comparados com os valores de “F tabelados” ( $F_{tab}$ ) para um nível de significância de 5%. O valor de  $F_{tab}$  é igual a  $F_{\alpha=0,05}(v1, v2)$ , obtido da Tabela A.1 do Anexo A, sendo  $v1$  e  $v2$  os graus de liberdade do efeito avaliado e do resíduo, respectivamente.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados da ANOVA realizado para os dados do raio médio dos poros. A análise estatística mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo, a partir da constatação de que o valor de  $F_{cal}$  do modelo é maior que o  $F_{tab}$ . Além disto, o valor resultante de  $R^2_{mod}$  foi igual 0,97, bastante elevado.

Tabela 4.4 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de raio médio dos poros, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.

Efeito	SQ	GL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	Resultado
Modelo	1,37 E-11	8	1,71 E-12	71,60	2,51	significativo
Erro (resíduo)	4,30 E-13	18	2,39 E-14	--	--	--
Total	1,41 E-11	26	--	--	--	--
Tipo de concreto (adição mineral)	1,23 E-11	2	6,14 E-12	257,27	3,55	significativo
Relação a/ag	6,98 E-13	2	3,49 E-13	14,62	3,55	significativo
Tipo de concreto x Tipo de concreto	6,92 E-13	4	1,73 E-13	7,25	2,93	significativo
Erro (resíduo)	4,30 E-13	18	--	--	--	--

$$R_{\text{mod}} = 0,98 \quad R^2_{\text{mod}} = 0,97$$

Onde:

SQ = Soma dos quadrados; GL = Graus de liberdade; MQ = Média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não;

$R^2_{\text{mod}}$  = Coeficiente de determinação do modelo e

$R_{\text{mod}}$  = Coeficiente de correlação do modelo.

A análise de variância também mostrou que os efeitos individuais dos fatores principais analisados; tipo de concreto e relação a/ag, são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%. Isto evidencia a influência de cada uma dessas variáveis independentes, quando tomadas isoladamente.

A variável mais influente no raio médio dos poros foi o tipo de concreto (dado pela presença de adições minerais), tendo a variável relação a/ag uma influência menor quando comparada com a variável tipo de concreto, fato desta ter um  $F_{\text{cal}}$  (257,27) bem maior que o  $F_{\text{cal}}$  (14,62) da variável relação a/ag. Quanto à interação, observa-se a sinergia dos fatores (variáveis), evidenciada pelo resultado estatisticamente significativo, demonstrando que o efeito que uma variável exerce sobre o raio médio depende da outra variável associada a ela.

Por último, realizou-se uma comparação múltipla de médias pelo método de Duncan para altura capilar<sup>7</sup> e raio médio dos poros, já que estas variáveis dependentes sofreram influência significativa das variáveis independentes tipo de concreto e relação a/g. Os resultados destas análises são apresentados na Figuras 4.5.

<sup>7</sup> Altura capilar: esta variável se comporta rigidamente igual à variável raio médio dos poros, já que ambos estão associados por um modelo matemático, ou seja, o raio médio dos poros é calculado (por meio da Equação 2.13) tendo-se como dado de entrada a altura capilar.

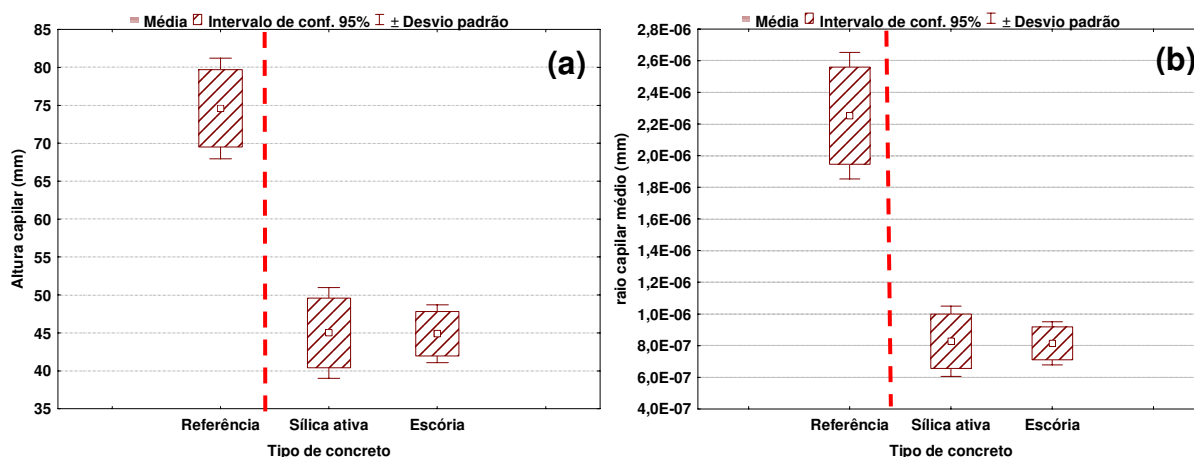


Figura 4.5 – Valores médios globais em função do tipo de concreto: (a) altura capilar, (b) raio médio dos poros. Com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

O agrupamento de médias referente à variável tipo de concreto, tanto para altura capilar quanto para raio médio dos poros, na Figura 4.5, resultou na formação de dois grupos, os quais estão separados por linhas tracejadas, que definem os grupos que diferem significativamente. Um grupo se refere aos concretos sem adição (referência) e outro grupo refere-se aos concretos com adição.

Observa-se, portanto, a diferença de comportamento dos concretos sem adição e com adição; o primeiro sugere que seus poros têm uma maior continuidade e, dessa forma, são mais abertos. O contrário ocorre com os concretos contendo adições minerais, os quais, devido ao melhoramento propiciado principalmente pelo refinamento dos poros, contribuem para desconectar os poros e, conseqüentemente, reduzir as alturas capilares.

No agrupamento de médias realizado com altura capilar e raio médio dos poros em função da relação  $a/ag$ , na Figura 4.6, verifica-se a existência de dois grupos distintos, ou seja, estes grupos são estatisticamente diferentes no que diz respeito aos seus efeitos tanto para altura capilar quanto ao raio médio dos poros. Em um grupo estão as relações  $a/ag$  0,35 e 0,45, e no outro a relação  $a/ag$  0,55.

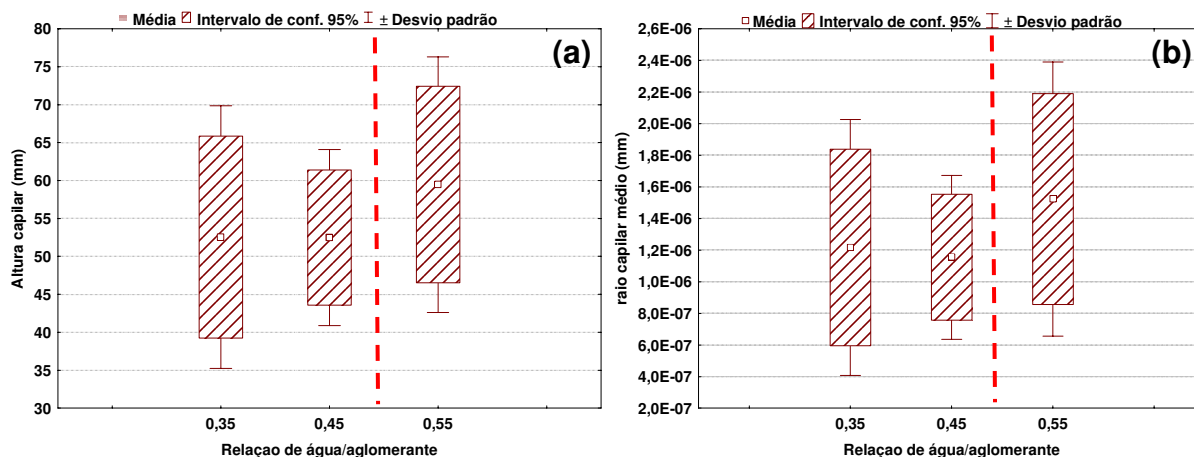


Figura 4.6 – Valores médios globais em função da relação a/ag: (a) altura capilar, (b) raio médio dos poros. Com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

### 4.1.3 Carbonatação

A Tabela 4.5 destaca a situação quanto à carbonatação dos concretos estudados nesta pesquisa.

Tabela 4.5 – Resultados médios e situação de carbonatação dos concretos.

Concreto	Teor de adição(%)	a/ag	Situação de carbonatação
			(%)
Referência	0	0,35	superficial
		0,45	superficial
		0,55	1,0 mm
		0,55*	não carbonatado
Sílica	10	0,35	superficial
		0,45	superficial
		0,55	1,5 mm
		0,55*	não carbonatado
Escória de Alto-forno	50	0,35	superficial
		0,45	superficial
		0,55	1,5 mm
		0,55*	não carbonatado

\*não carbonatado

Pode-se observar na Tabela 4.5, excetuando-se os concretos de relação a/ag 0,55 que ficaram protegidas da ação do CO<sub>2</sub> (linha com “\*” na referida tabela), os quais não permitiram a ocorrência de carbonatação, os demais apresentaram muito baixa espessura carbonatada. Os corpos-de-prova que apresentaram alguma frente de carbonatação digna de registro foram aqueles cuja relação a/ag foi igual a 0,55; contudo, os valores medidos foram muito baixos. Os concretos com sílica ativa e com escória de alto-forno, na relação

a/ag 0,55, mostraram valores carbonatados um pouco mais elevados (1,5 mm) em comparação ao concreto de referência (1,0 mm).

## 4.2 RESULTADOS DAS PROPRIEDADES DE TRANSPORTE DE MASSA NO CONCRETO

Neste item, são abordados os resultados dos ensaios utilizados para avaliar as propriedades relacionadas aos mecanismos de transporte de massa.

### 4.2.1 Absorção capilar

Na Tabela 4.6 estão apresentados os resultados médios dos ensaios de absorção de água por capilaridade para idade de 84 dias, referentes à região do cobrimento e à região interna do concreto. Os resultados individuais estão apresentados no Anexo C.

Tabela 4.6 – Resultados médios de absorção capilar.

Concreto	Teor de adição(%)	Código	Absorção por capilaridade (g/cm <sup>2</sup> )
			(ABNT NBR 9779 : 1995)
Referência	0	RC35	0,97
		RI35	1,29
		RC45	1,27
		RI45	1,54
		RC55	1,47
		RI55	1,56
Sílica Ativa	10	SC35	0,56
		SI35	0,63
		SC45	0,74
		SI45	0,96
		SC55	0,85
		SI55	1,07
Escória de Alto-forno	50	EC35	0,46
		EI35	0,57
		EC45	0,62
		EI45	0,90
		EC55	0,70
		EI55	0,99

O menor valor de absorção capilar foi de 0,46 g/cm<sup>2</sup> obtido pelo concreto com adição de escória de alto-forno, seguido do concreto com sílica ativa com 0,56 g/cm<sup>2</sup>.

Na Tabela 4.7 são apresentados os resultados obtidos na análise estatística de variância (ANOVA) dos valores de absorção capilar.

Tabela 4.7 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de absorção capilar, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.

Efeito	SQ	GL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	Resultado
Modelo	5,18	17	0,30	58,46	2,02	significativo
Erro (resíduo)	0,14	27	5,21E-3	--	--	--
Total	5,32	44	--	--	--	--
Tipo de concreto (adição mineral)	3,50	2	1,75	335,82	3,35	significativo
Relação a/g	0,99	2	0,49	94,56	3,35	significativo
Região do concreto	0,46	1	0,46	89,25	4,21	significativo
Adição x Relação a/ag	4,74E-3	4	1,18E-3	0,23	2,73	não significativo
Adição x Região do concreto	8,30E-3	2	4,15E-3	0,79	3,35	não significativo
Relação a/g x Região do concreto	1,53E-2	2	7,66E-3	1,47	3,35	não significativo
Adição x Relação a/g x Região do concreto	6,59E-2	4	1,65E-2	3,16	2,73	significativo
Erro (resíduo)	0,14	27	5,22E-3	--	--	--

$R_{\text{mod}} = 0,99$   $R^2_{\text{mod}} = 0,97$

Onde:

SQ = Soma dos quadrados; GL = Graus de liberdade; MQ = Média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não;

$R^2_{\text{mod}}$  = Coeficiente de determinação do modelo e

$R_{\text{mod}}$  = Coeficiente de correlação do modelo.

A análise estatística mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo, a partir da constatação que o valor de  $F_{\text{cal}}$  do modelo é maior que o  $F_{\text{tab}}$ . Além disto, o valor resultante de  $R^2_{\text{mod}}$  foi 0,97, o que significa que 97% da variação total dos dados é explicada pelo modelo.

A análise de variância também mostrou que os efeitos individuais dos fatores principais analisados, ou seja, tipo de adição, relação a/ag e região do concreto, são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%. Isto confirma a influência de cada uma dessas variáveis independentes, quando tomadas isoladamente.

A variável mais influente na absorção capilar foi o tipo de concreto (adição mineral), em segundo lugar apresentou-se a variável relação a/ag e a menor influência foi exercida pela região do concreto. Quanto às interações duplas e a tripla, observa-se a sinergia dos fatores apenas para interação tripla, evidenciada pelo resultado estatisticamente significativo dessa interação, demonstrando que o efeito que uma variável exerce sobre a absorção capilar depende das outras variáveis associadas a ela, mesmo que não tão destaca, pois verifica-se que o  $F_{\text{cal}}$  é apenas um pouco maior que o  $F_{\text{tab}}$ . Sobre as interações duplas, em qualquer caso não houve interação significativa. Isto significativa que o efeito que cada fator (variável independente) exerce individualmente nos valores de absorção capilar independe de qualquer outro fator associado a ele. Por exemplo, o tipo de concreto (dado pela presença de adições

minerais) exerce influência significativa nos valores de absorção por capilaridade e essa influência independe do efeito da relação a/ag ou do efeito da região do concreto (quando tomadas duas a duas). Por fim, realizou-se comparação múltipla de médias pelo método de Duncan, em virtude da influência das variáveis: tipo de concreto, relação a/ag e região do concreto. Os resultados destas análises são apresentados a seguir.

#### 4.2.1.1 Influência da relação água/aglomerante

Na Figura 4.9 são mostrados os valores médios de absorção capilar para cada tipo de concreto (adição) em função da relação a/ag.

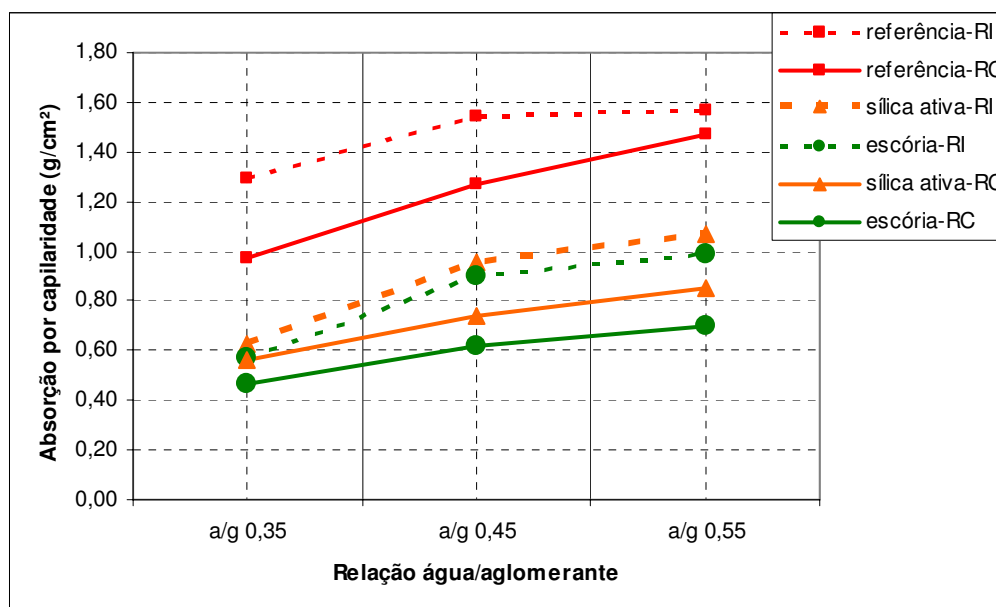


Figura 4.7 – Valores médios de absorção capilar para tipo de concreto em função da relação a/ag. (RI – região interna / RC – região do cobrimento)

Observa-se na Figura 4.7 que está nítido o distanciamento do concreto referente à região interna em relação ao concreto do cobrimento para todos os tipos de concreto, confirmando o que já foi constatado, que a região do concreto influi de maneira significativa na propriedade de absorção capilar. Além disto, verifica-se que a tendência de crescimento dos valores de absorção capilar com o aumento da relação a/ag pode ser atribuída a uma porosidade muito mais aberta e interconectada para os concretos com maior relação a/ag Neville (1997).

Na Figura 4.8 está apresentado o resultado do agrupamento de médias, onde as linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente, na qual se constata que as três relações água/aglomerante consideradas neste estudo, produzem efeitos estatisticamente diferentes sobre a absorção por capilaridade.

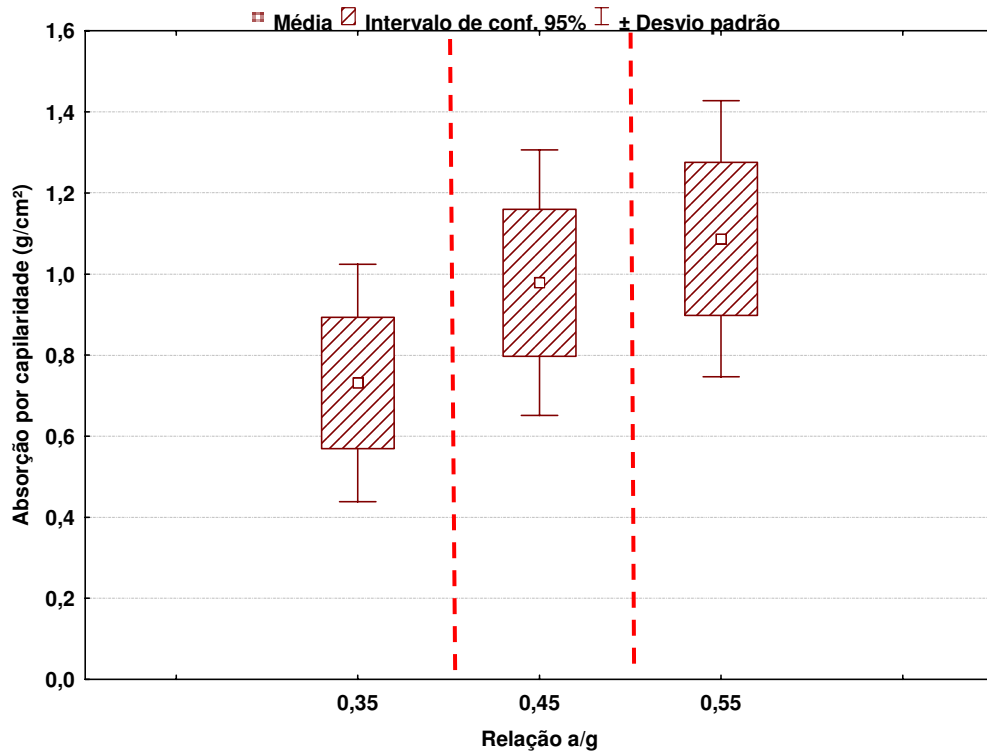


Figura 4.8 – Valores médios globais de absorção capilar em função da relação água/aglomerante, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

#### 4.2.1.2 Influência da adição mineral

Na Figura 4.9 são mostrados os valores médios globais de absorção capilar para cada tipo de concreto (adição), com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

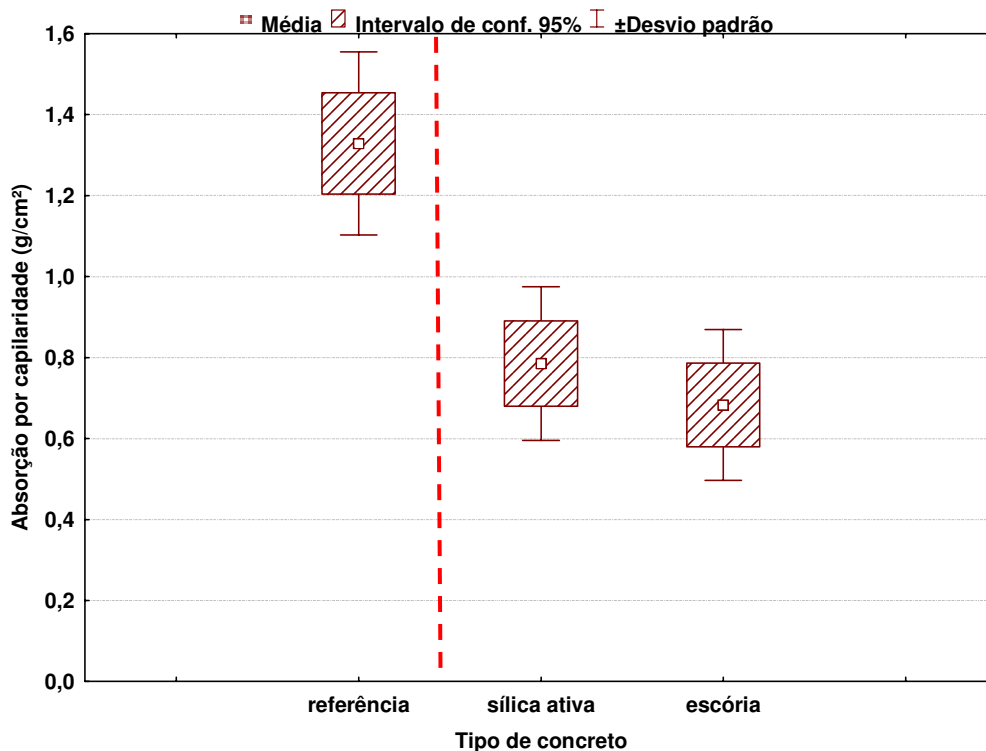


Figura 4.9 – Valores médios globais de absorção capilar em função do tipo do concreto (adição), com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

Observa-se, na Figura 4.9, que os concretos com as adições minerais (sílica ativa ou escória de alto-forno) pertencem ao mesmo grupo, corroborando o que afirma Neville (1997), que o refinamento de poros provocado pela inserção das adições minerais na matriz de cimento portland, em geral, promove reduções significativas na absorção capilar dos concretos. Ferreira (2003) em seu estudo com várias adições minerais obteve concretos com escória de alto-forno e sílica ativa pertencendo ao mesmo grupo frente à absorção capilar. Estes resultados apresentados de absorção por capilaridade, em especial os que comparam o efeito das adições minerais nessa propriedade, são totalmente coerentes com os resultados apresentados e discutidos referentes à avaliação de raio médio (subitem 4.1.21 e as Figuras 4.5 e 4.6) dos poros, ou seja, os concretos com adições possuem poros de menor diâmetro e, provavelmente, menos conectados e mais tortuosos, o que explica seus valores de absorção por capilaridade menores em relação aos concretos de referência (sem adição).

### 4.2.1.3 Influência da região do concreto

Verifica-se, na Figura 4.10, que as regiões<sup>8</sup> interna e do cobrimento diferem significativamente frente à absorção capilar, de tal maneira que na região do cobrimento o resultado mostrou-se melhor quando comparado com aquele da região interna. Isto contraria, em princípio, a literatura, que considera o cobrimento como sendo uma região mais porosa devido ao efeito-parede, à maior relação a/c nessa região e aos efeitos da segregação do concreto durante as operações de lançamento e adensamento (vibração) do concreto. Cabe ressaltar, todavia, que o resultado expresso na Figura 4.10 reflete a tendência geral observada em todo o trabalho, na qual o concreto de cobrimento se comporta melhor do que o concreto da região interna.

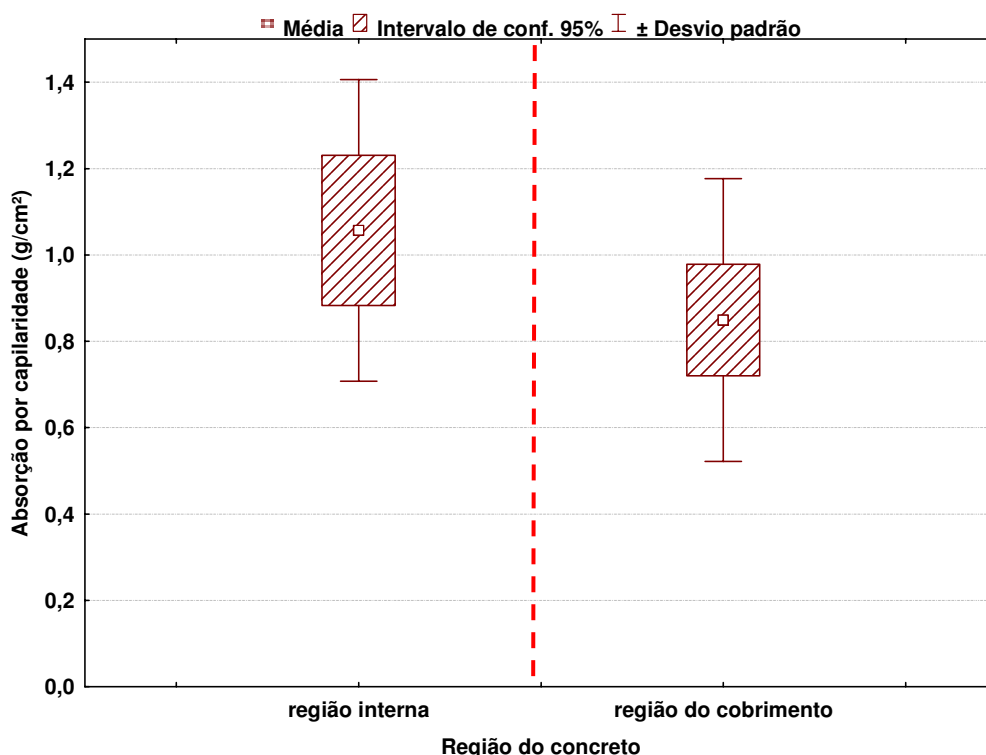


Figura 4.10 – Valores médios globais de absorção capilar em função da região do concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

<sup>8</sup> Região do concreto - a provável hipótese que explica a região do cobrimento se comportar melhor que a região interna, encontra-se no item 4.4.

## 4.2.2 Permeabilidade ao ar

Na Tabela 4.8 estão apresentados os resultados médios dos concretos submetidos ao ensaio de permeabilidade ao ar com as respectivas classificações quanto à permeabilidade, conforme a classificação sugerida por Cather *et al.* (1984). Embora as condições de ensaio empregadas para a elaboração da proposta de classificação sugerida por Cather *et al.* (1984), não tenham sido rigidamente adotadas e tendo em vista a variabilidade interna do método ser relativamente alta, a adoção dessa classificação não deixa de ser interessante, pois nela se tem uma noção aproximada da qualidade dos concretos estudados. Os resultados individuais estão apresentados no Anexo C.

Tabela 4.8– Resultados médios de permeabilidade ao ar, com as respectivas classificações conforme a proposta de Cather et al (1984).

Concreto	Teor de adição(%)	Código	Permeabilidade ao ar (segundos)	Classificação	
			(Método de Figg)	Categoria	Interpretação
Referência	0	RC35	670	3	Ótima
		RC45	606	3	Ótima
		RC55	178	2	Boa
Sílica Ativa	10	SC35	825	3	Ótima
		SC45	748	3	Ótima
		SC55	374	3	Ótima
Escória de Alto-forno	50	EC35	430	3	Ótima
		EC45	66	1	Moderada
		EC55	57	1	Moderada

Observa-se na Tabela 4.8 que os concretos, em geral, apresentaram uma permeabilidade classificada como ótima e boa, exceto os concretos de escória referente as relações  $a/ag$  iguais a 0,45 e 0,55, os quais foram classificados como possuindo permeabilidade moderada. Esta classificação contrariou o que se esperava, pois é sabido que as adições reduzem a permeabilidade do concreto quando comparado com o concreto de referência. Buscando uma explicação para o fato, constatou-se que os concretos de escória, no que diz respeito à aparência superficial, apresentaram uma superfície de aparência irregular, quando comparada com outros concretos, como se verifica na Figura 4.11. Uma superfície irregular resulta em uma superfície mais heterogênea e mais difícil de executar o ensaio, haja vista que toda a região de borda do furo precisa estar bem vedada de modo que a perda de vácuo se dê única e exclusivamente através da estrutura interna e porosidade do concreto da camada de cobrimento (a profundidade dos furos no corpo-de-prova de concreto para realização de tal ensaio se localizam nos primeiros 4 cm da região do cobrimento), e não por falhas nessa vedação superficial. Isso pode ter influenciado diretamente os resultados do ensaio de permeabilidade ao ar para os concretos com escória.

Na Tabela 4.9 são apresentados os resultados obtidos na análise estatística de variância (ANOVA) dos valores de permeabilidade ao ar, salientando-se que, para este estudo, não está considerada a variável *região do concreto*, uma vez que todos os ensaios de permeabilidade ao ar foram executados sobre os protótipos de viga (conforme destacado no subitem 3.5.2.3 do Capítulo 3).

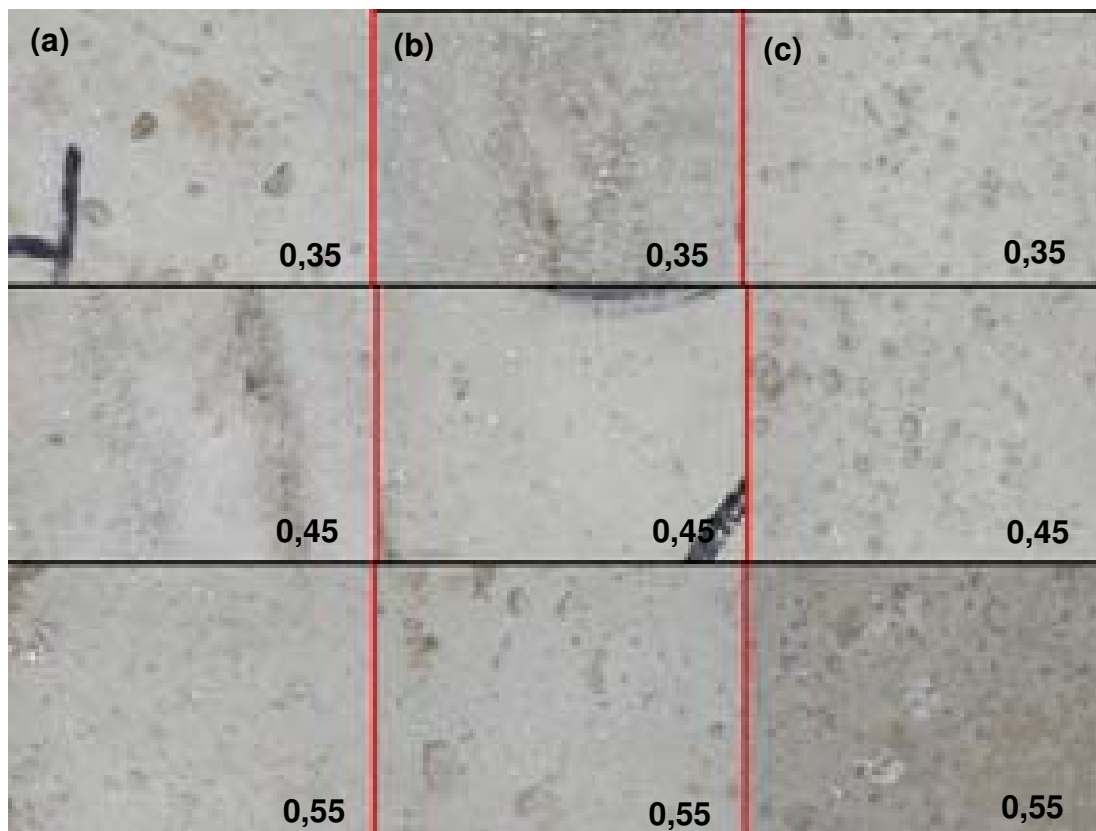


Figura 4.11 – Aparência superficial dos concretos estudados: (a) concreto referência; (b) concreto com sílica ativa; (c) concreto com escória de alto-forno.

Tabela 4.9 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de permeabilidade ao ar, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	Ftab	Resultado
Modelo	2,73E+6	8	3,41E+5	27,27	2,31	significativo
Erro (resíduo)	3,38E+5	27	12521,59	--	--	--
Total	3,07E+6	35	--	--	--	--
Tipo de concreto (adição mineral)	1,33E+6	2	6,65E+5	53,10	3,35	significativo
Relação a/g	1,18E+6	2	5,88E+5	46,98	3,35	significativo
Tipo de concreto x Relação a/g	2,25E+5	4	56369,56	4,50	2,73	significativo
Erro (resíduo)	3,38E+5	27	12521,59	--	--	--
$R_{\text{mod}} = 0,94$ $R^2_{\text{mod}} = 0,88$						

Onde:

SQ = Soma dos quadrados; GL = Graus de liberdade; MQ = Média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não;

$R^2_{\text{mod}}$  = Coeficiente de determinação do modelo e

$R_{\text{mod}}$  = Coeficiente de correlação do modelo.

A análise estatística mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo, a partir da constatação que o valor de  $F_{cal}$  do modelo é maior que o  $F_{tab}$ . Além disto, o valor resultante de  $R^2_{mod}$  foi 0,88 adequado (credenciando o modelo a ser empregado na análise), cujo valor foi igual a 0,88.

A análise de variância também mostrou que os efeitos individuais dos fatores principais analisados: tipo de concreto (adição mineral) e relação a/ag, são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%, o que confirma a influência de cada uma dessas variáveis independentes, quando tomadas isoladamente.

A variável mais influente na permeabilidade ao ar foi o tipo de concreto (adição mineral), em seguida, apresentou-se a variável relação a/ag. Quanto à interação, verifica-se um resultado significativo para a interação dupla, demonstrando que o efeito que uma variável exerce sobre a permeabilidade ao ar depende da outra variável associada a ela.

A seguir, realizou-se comparação múltipla de médias pelo método de Duncan, em virtude da influência das variáveis: tipo de adição e relação a/g. Os resultados destas análises são abordados a seguir.

#### 4.2.2.1 Influência da relação água/aglomerante

Na Figura 4.12 são mostrados os valores médios de permeabilidade ao ar para cada tipo de concreto (adição mineral) em função da relação a/ag.

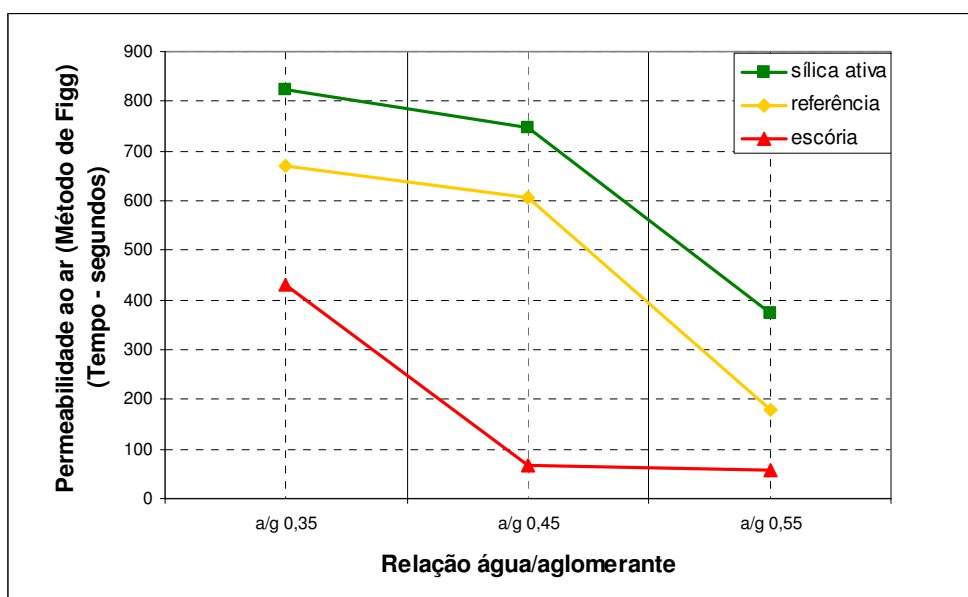


Figura 4.12 – Valores médios de permeabilidade ao ar para cada tipo de concreto em função da relação a/ag.

Observa-se, na Figura 4.12, que os melhores concretos frente à permeabilidade ao ar foram os concretos com sílica ativa e referência, os quais somente apresentaram uma tendência de piora acentuada em suas permeabilidades para a relação água/aglomerante igual a 0,55. Tal comportamento foi diferente para o concreto de escória, que tendeu a piorar a sua permeabilidade de maneira extremamente acentuada já para a relação a/ag igual a 0,45 que, por sua vez, obteve uma permeabilidade bem próxima do concreto de relação a/ag igual a 0,55.

Na Figura 4.13 está apresentado o resultado do agrupamento de médias, onde as linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente. Observa-se que a relação a/ag igual 0,45 teve uma maior variação dos dados quando comparado com os demais; isto se deve, provavelmente, ao fato da permeabilidade do concreto de escória ser bem diferente dos outros dois tipos de concreto.

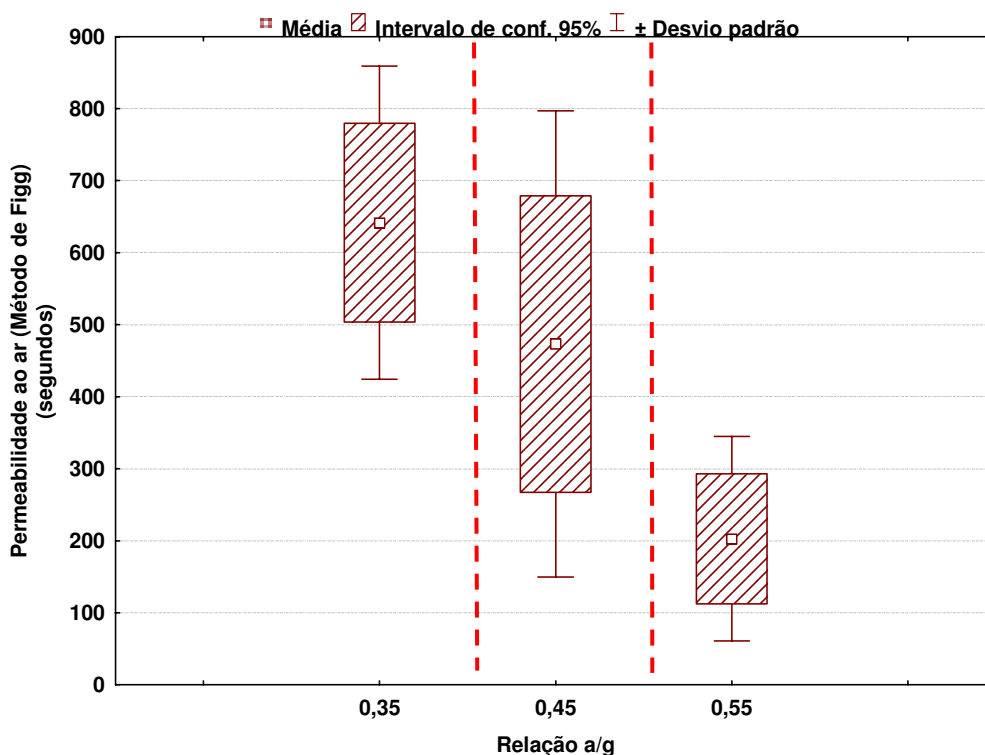


Figura 4.13 – Valores médios globais de permeabilidade ao ar em função da relação água/aglomerante, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

#### 4.2.2.2 Influência da adição mineral

Na Figura 4.14 são mostrados, os valores médios globais de permeabilidade ao ar para cada tipo de concreto (adição), com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

Verifica-se na Figura 4.14, conforme já foi comentado, que o concreto de escória é bem pior que os demais, tendo sua média global exatamente igual a 203 segundos, enquanto os concretos com sílica e sem adição apresentaram uma média global igual a 642 s e 473 s, respectivamente. O resultado superior do concreto com sílica ativa (em comparação ao concreto de referência) confirma a tendência dos resultados das propriedades anteriores, reforçando a tese do refinamento de poros como um aspecto decisivo da redução do transporte de massa através do concreto, no caso a permeabilidade ao ar. Pelos argumentos colocados anteriormente em relação aos concretos de escória, sua análise em relação à permeabilidade ao ar ficou prejudicada.

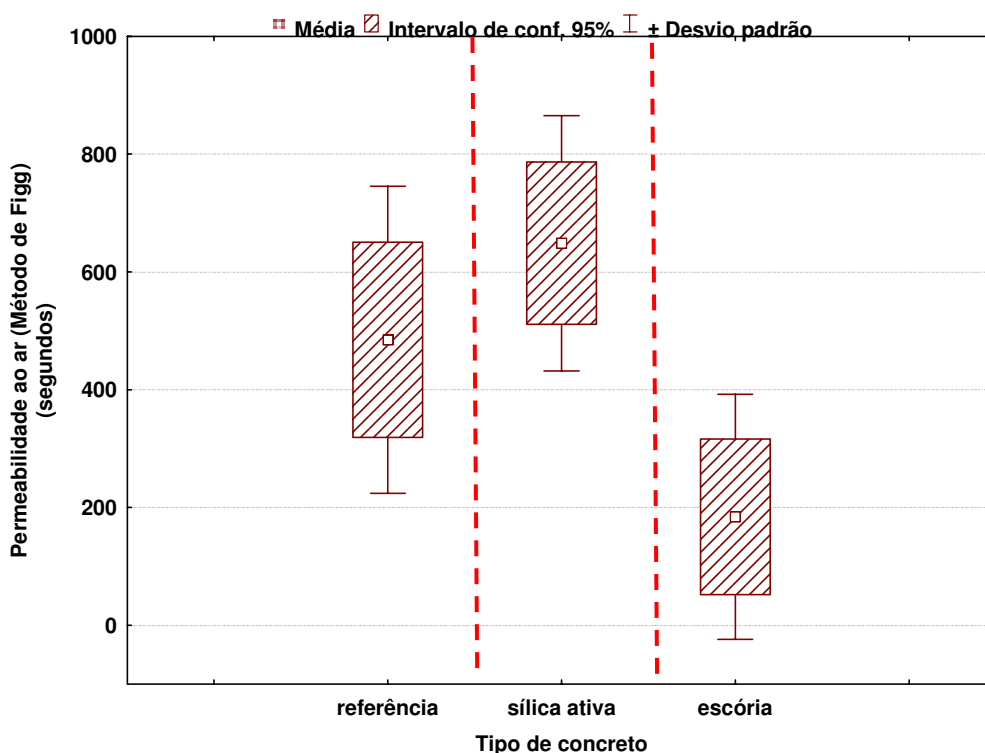


Figura 4.14 – Valores médios globais de permeabilidade ao ar em função do tipo de concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

### 4.2.3 Penetração de água sob pressão

Na Tabela 4.10 estão apresentados os resultados médios dos concretos submetidos ao ensaio de penetração de água sob pressão para idade de 84 dias, referente à região do cobrimento e à região interna do concreto. Os resultados individuais estão apresentados no Anexo C.

Observa-se que os menores valores de penetração de água sob pressão foram com os concretos com sílica ativa, em seguida os concretos de referência e, por último, os concretos com escória de alto-forno. Também para o presente ensaio os concretos com escória apresentaram os piores resultados mostrando que, diante ao mecanismo de permeabilidade, houve um comportamento inferior desses concretos com escória de alto-forno. Isto pode ser explicado, também, como relatado para o ensaio de permeabilidade ao ar, pela sua característica superficial irregular, que denota uma superfície de pior qualidade quando comparada com os outros tipos de concreto, já que tanto o ensaio de permeabilidade ao ar, quanto o ensaio de penetrabilidade de água sob pressão, podem ter sofrido influência da camada superficial.

Tabela 4.10 – Resultados médios de penetração de água sob pressão.

Concreto	Teor de adição(%)	Código	Penetração de água sob pressão (mm)
			(ABNT NBR 10787 : 1994)
Referência	0	RC35	11,00
		RI35	16,50
		RC45	27,78
		RI45	43,23
		RC55	29,18
		RI55	52,98
Sílica	10	SC35	5,18
		SI35	10,88
		SC45	10,88
		SI45	7,40
		SC55	19,85
		SI55	28,99
Escória de Alto-forno	50	EC35	24,59
		EI35	31,88
		EC45	44,32
		EI45	36,56
		EC55	70,77
		EI55	55,76

De acordo com a Tabela 4.10, a grande maioria dos concretos teve um resultado de penetração de água sob pressão inferior a 50 mm, que segundo Neville (1997) é classificada como sendo “impermeável”. Considerando de maneira particular, conforme também Neville (1997), tem-se os concretos de sílica ativa como sendo “impermeável em condições agressivas”, pois estes tiveram penetrações inferiores a 30 mm.

Na Tabela 4.11 são apresentados os resultados obtidos na análise estatística de variância (ANOVA) dos valores de penetração de água sob pressão.

A análise estatística mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo, a partir da constatação que o valor de  $F_{cal}$  do modelo é maior que o  $F_{tab}$ . Além disto, o valor resultante de  $R^2_{mod}$  igual a 0,96.

A análise de variância também evidenciou que os efeitos individuais dos fatores principais analisados: tipo de concreto (adição mineral), relação a/ag e região do concreto são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%.

Como em todas os outros mecanismos de transporte estudados até o momento, a variável mais influente na penetração de água sob pressão foi a adição mineral, em segundo lugar apresentou-se a variável relação a/ag e a menor influência foi exercida pela região do concreto. Quanto às interações duplas e a tripla, observa-se uma sinergia entre os fatores, uma vez que as interações duplas e tripla resultaram estatisticamente significativos (exceto a interação relação a/ag x região do concreto) demonstrando que o efeito que uma variável exerce sobre a penetração de água sob pressão depende da outra variável associada a ela.

Tabela 4.11 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de penetração de água sob pressão, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.

Efeito	SQ	GL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	Resultado
Modelo	17437,34	17	1025,73	49,17	1,93	significativo
Erro (resíduo)	750,96	36	20,86	--	--	--
Total	18188,30	53	--	--	--	--
Tipo de concreto (adição mineral)	8179,85	2	4089,93	196,06	3,27	significativo
Relação a/ag	6226,78	2	3113,39	149,25	3,27	significativo
Região do concreto	275,09	1	275,09	13,19	4,12	significativo
Adição x Relação a/ag	1077,21	4	269,30	12,91	2,64	significativo
Adição x Região do concreto	910,81	2	455,40	21,83	3,27	significativo
Relação a/ag x Região do concreto	65,35	2	32,67	1,57	3,27	Não significativo
Adição x Relação x a/ag x Região do concreto	702,26	4	175,56	8,42	2,64	significativo
Erro (resíduo)	750,96	36	20,86	--	--	--

$$R_{mod} = 0,98 \quad R^2_{mod} = 0,96$$

Onde:

SQ = Soma dos quadrados; GL = Graus de liberdade; MQ = Média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não;

$R^2_{mod}$  = Coeficiente de determinação do modelo e

$R_{mod}$  = Coeficiente de correlação do modelo.

A seguir, realizou-se comparação múltipla de médias pelo método de Duncan, face à influência das variáveis: tipo de concreto, relação a/g e região do concreto. Os resultados dessas análises são apresentados a seguir.

#### 4.2.3.1 Influência da relação água/aglomerante

Na Figura 4.15 são mostrados os valores médios de penetração de água sob pressão para cada tipo de concreto (adição) em função da relação a/ag.

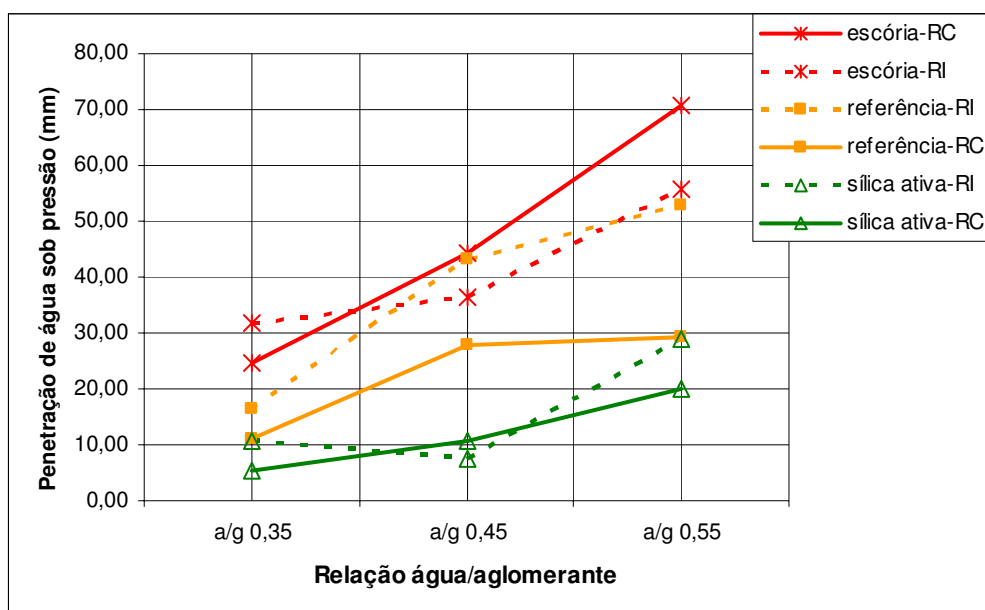


Figura 4.15 – Valores médios de penetração de água sob pressão para cada tipo de concreto em função da relação a/ag (RI – região interna/RC – região do cobrimento).

Verifica-se, na Figura 4.15, que no ensaio de penetração de água sob pressão, há uma tendência de crescimento de penetração de água com o aumento da relação a/ag, conforme foi visto também para absorção capilar. Isto se deve ao aumento da porosidade na medida que se aumenta a relação a/ag.

Na Figura 4.16 está apresentado o resultado do agrupamento de médias, onde as linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente, na qual se pode constatar grupos bem definidos, ou seja, que as relações água/aglomerante consideradas neste estudo, cada uma delas influi de maneira particular frente à penetração de água sob pressão.

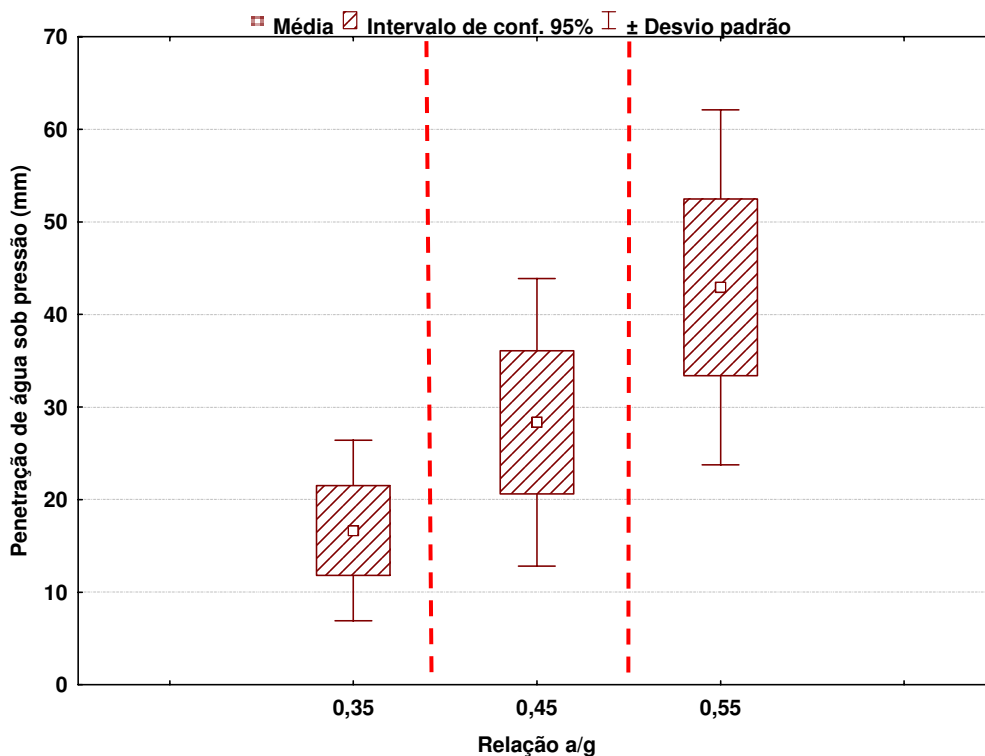


Figura 4.16 – Valores médios globais de penetração de água sob pressão em função da relação água/aglomerante, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

#### 4.2.3.2 Influência da adição mineral

Na Figura 4.17 são mostrados os valores médios globais de penetração de água sob pressão para cada tipo de concreto (adição), com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

Verifica-se, na Figura 4.17, que mais uma vez o concreto de escória apresentou o pior resultado, tendo sua média global exatamente igual a 43,97 mm, bem distante da média global obtida pelo concreto com sílica ativa que foi de 13,83 mm. Como comentado anteriormente, o aspecto irregular da superfície do concreto com escória pode ter afetado negativamente o seu comportamento frente à penetração de água sob pressão.

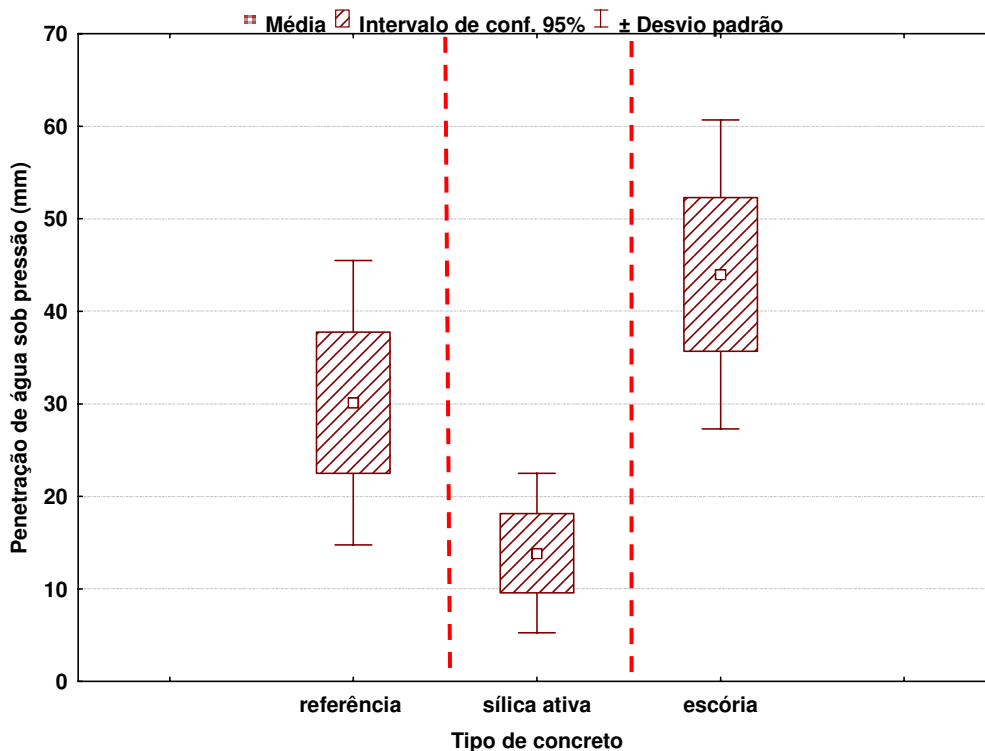


Figura 4.17 – Valores médios globais de penetração de água sob pressão em função do tipo de concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

#### 4.2.3.3 Influência da região do concreto

Verifica-se, na Figura 4.18, que a região do cobrimento e a região interna do concreto, diferem significativamente frente à penetração de água sob pressão. Pode-se observar, também, para a presente avaliação que a região do cobrimento mostrou-se melhor quando comparada com a região interna. Embora as médias globais dos valores de penetração de água das duas regiões estejam relativamente próximas, todavia o resultado da análise estatística mostrou-se significativo, o que reforça, realmente, que essas regiões são diferentes e que a região do cobrimento se mostra mais compacta.

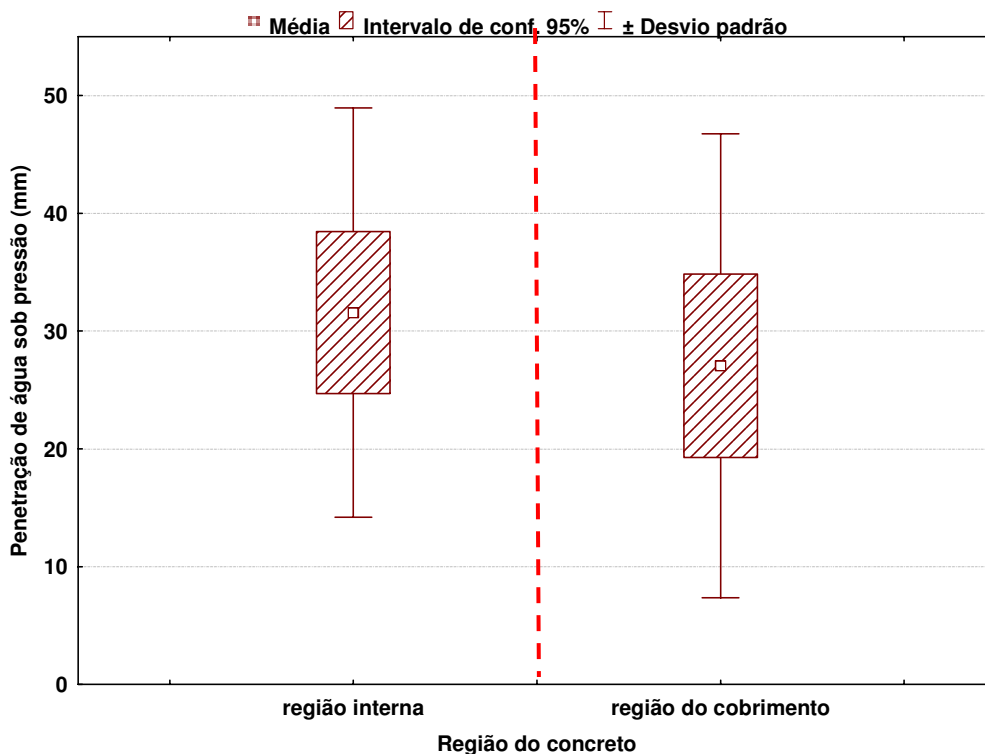


Figura 4.18 – Valores médios globais de penetração de água sob pressão em função da região do concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

#### 4.2.4 Penetrabilidade de cloretos

Os resultados dos ensaios de penetrabilidade de cloretos foram analisados a partir de dois enfoques distintos, primeiramente apresenta-se uma análise de acordo com os critérios de classificação quanto ao risco de penetração de cloretos definidos pela ASTM C 1202 : 2009, conforme mostrado na Tabela 2.5 e, posteriormente, apresenta-se e discute-se os resultados com base em uma análise de variância (ANOVA). Os resultados individuais estão apresentados no Anexo C.

A Tabela 4.12, a seguir, apresenta os resultados médios dos ensaios de penetrabilidade de cloretos e a classificação de acordo com a ASTM C 1202 : 2009.

Tabela 4.12 – Resultados médios de carga passante e classificação de acordo com a ASTM C 1202 : 2009.

Concreto	Teor de adição(%)	Código	Carga passante (C)	ASTM C 1202 : 2009 (classificação)
Referência	0	RC35	3246	Moderada
		RI35	4217	Alta
		RC45	5924	Alta
		RI45	8063	Alta
		RC55	9250	Alta
		RI55	11993	Alta
Sílica	10	SC35	139	Muito baixa
		SI35	169	Muito baixa
		SC45	264	Muito baixa
		SI45	354	Muito baixa
		SC55	675	Muito baixa
		SI55	808	Muito baixa
Escória de Alto-forno	50	EC35	444	Muito baixa
		EI35	470	Muito baixa
		EC45	887	Muito baixa
		EI45	688	Muito baixa
		EC55	1295	Baixa
		EI55	1066	Baixa

A menor carga passante medida foi de 139 C obtida pelo concreto com adição de sílica ativa com relação a/ag 0,35 referente à região do cobrimento, sendo que o concreto sem adição (referência), com a mesma relação a/ag e também referente a região do cobrimento, obteve uma carga passante de 3236 C, ou seja, com incremento de apenas 10% de sílica ativa foi capaz de reduzir a carga passante no concreto em 23 vezes, aproximadamente. Isto denota e enfatiza a importância da adição mineral no que tange à penetração de cloretos.

De maneira geral, pode-se observar, conforme está apresentado na Tabela 4.12, que os concretos com adições de escória e sílica ativa se mantiveram na classificação de carga passante (da ASTM C 1202) “muito baixa”, ao contrário, do concreto sem adição (referência), cuja a classificação de carga passante foi “alta”.

A seguir é apresentada uma abordagem estatística dos resultados de penetrabilidade de cloretos, fundamentada na análise de variância (ANOVA) dos valores de carga passante, conforme apresentado na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de carga passante, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	Ftab	Resultado
Modelo	6,75E+08	17	3,97E+07	135,57	1,93	significativo
Erro (resíduo)	1,05E+07	36	2,93E+05	--	--	--
Total	6,86E+08	53	--	--	--	--
Tipo de concreto (adição mineral)	5,10E+08	2	2,55E+08	870,76	3,27	significativo
Relação a/g	6,74E+07	2	3,37E+07	115,08	3,27	significativo
Região do concreto	5,42E+06	1	5,42E+06	18,51	4,12	significativo
Adição x Relação a/g	7,78E+07	4	1,94E+07	66,41	2,64	significativo
Adição x Região do concreto	1,18E+07	2	5,91E+06	20,17	3,27	significativo
Relação a/g x Região do concreto	6,70E+05	2	3,35E+05	1,14	3,27	não significativo
Adição x Relação a/g x Região do concreto	1,83E+06	4	4,58E+05	1,56	2,64	não significativo
Erro (resíduo)	1,05E+07	36	2,93E+05			

$$R_{\text{mod}} = 0,99 \quad R^2_{\text{mod}} = 0,98$$

Onde:

SQ = Soma dos quadrados; GL = Graus de liberdade; MQ = Média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não;

$R^2_{\text{mod}}$  = Coeficiente de determinação do modelo e

$R_{\text{mod}}$  = Coeficiente de correlação do modelo.

A análise estatística dos resultados mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo, resultando em um valor de  $R^2_{\text{mod}}$  igual a 0,98. A análise mostrou, também, que os efeitos individuais dos fatores principais analisados: tipo de concreto (adição), relação a/ag e região do concreto, são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%, evidenciando a influência que cada uma das variáveis independentes exerce na penetrabilidade de cloretos, quando tomada isoladamente.

Tomando-se como base a magnitude dos valores de  $F_{\text{cal}}$ , pode-se constatar que a variável mais influente na penetrabilidade de cloretos foi tipo de concreto (adição), seguida de relação a/ag e região do concreto, nesta ordem.

Quanto às interações entre as variáveis (fatores), somente as interações duplas mostraram significativas, o que significa que houve uma sinergia dos fatores, tais interações foram entre tipo de concreto (adição) e relação a/ag e entre tipo de concreto (adição) e região do concreto, demonstrando que o efeito que uma variável exerce sobre o ensaio de penetrabilidade de cloretos depende da outra variável associada a ela.

Em virtude da influência das variáveis do modelo mostrar-se ser estatisticamente significativa, realizou-se a comparação múltipla de médias pelo método de Duncan. Os resultados destas análises estão expostos e discutidos a seguir.

#### 4.2.4.1 Influência da relação água/aglomerante

Na Figura 4.19 são mostrados os valores médios de carga passante para cada tipo de concreto (adição) em função da relação a/ag e o resultado do agrupamento de médias está apresentado na Figura 4.20, onde as linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

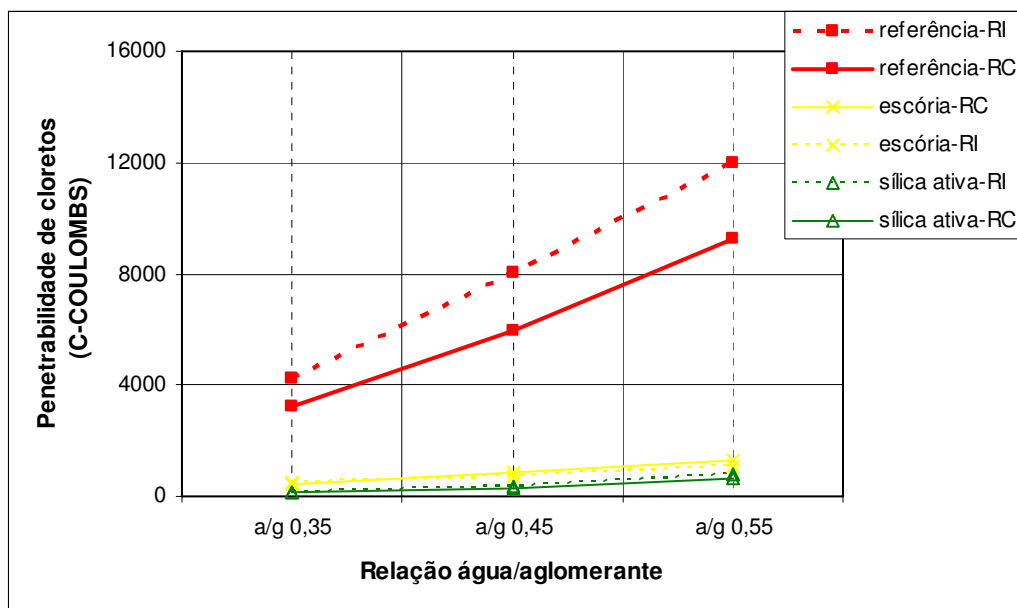


Figura 4.19 – Valores médios de penetrabilidade de cloretos para cada tipo de concreto em função da relação a/ag (RI – região interna/RC – região do cobrimento).

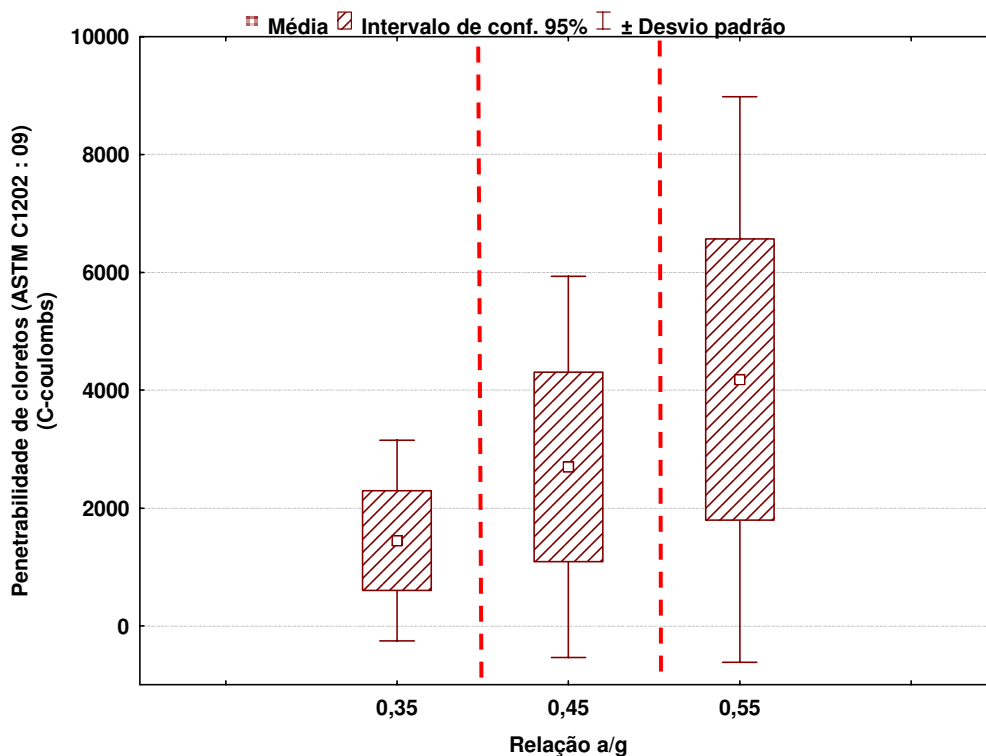


Figura 4.20 – Valores médios globais de penetrabilidade de cloretos em função da relação a/g, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

Analisando-se a Figura 4.20 percebe-se um comportamento muito bem definido, caracterizado pelo crescimento do valor da carga passante com o aumento da relação a/g; comportamento similar também foi observado por Boddy *et al.* (2001), Gruber *et al.* (2001), Ferreira (2003). Percebe-se que este comportamento é mais pronunciado no concreto de referência, enquanto que nos concretos com adições este aumento é pouco acentuado (Figura 4.19).

#### 4.2.4.2 Influência da adição mineral

Na Figura 4.21 são mostrados, os valores médios globais de carga passante para cada tipo de concreto (adição), com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente obtidos através do teste de Duncan.

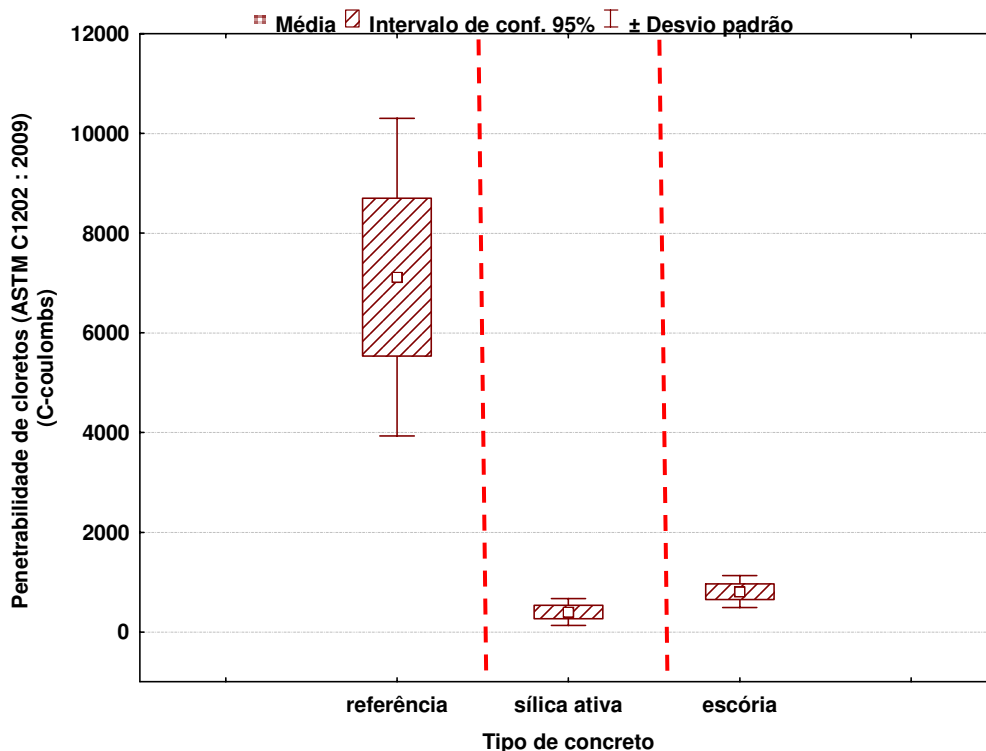


Figura 4.21 – Valores médios globais de penetrabilidade de cloretos em função do tipo de concreto (adição), com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

Observa-se na Figura 4.21, na qual expõe o resultado global do experimento sob o ponto de vista da análise do tipo de concreto (adição), a tendência geral da penetrabilidade de cloretos, cujos valores de carga passante reduzem na seguinte ordem: referência, escória e sílica ativa. Visto que os concretos com adições (sílica ativa, escória) os seus valores de carga passante são extremamente menores do que os concretos sem adição (referência).

Os concretos com adições minerais sempre apresentaram maior resistência à penetração de cloretos quando comparados aos concretos de referência, como se pode notar nas Figuras 4.19 e 4.21 e pela análise de variância que apontou esta variável como a mais importante quando se pretende obter concretos com menores valores de penetrabilidade de cloretos. Este fato foi constatado por vários pesquisadores (MALHOTRA, 1992; OLLIVIER, 1998; HASSAN *et al.*, 2000; BODDY *et al.*, 2001; GRUBER *et al.*, 2001; NEHDI *et al.*, 2003; FERREIRA, 2003).

#### 4.2.4.3 Influência da região do concreto

Na Figura 4.22 são mostrados, os valores médios globais de carga passante para diferentes regiões do concreto, tais como, região do cobrimento e região interna com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente obtidos através do teste de Duncan.

Nota-se, novamente, na Figura 4.22, que a região do cobrimento mostrou-se ter a média global inferior na região interna do concreto, conforme foi visto nos ensaios de absorção capilar e penetração de água sob pressão.

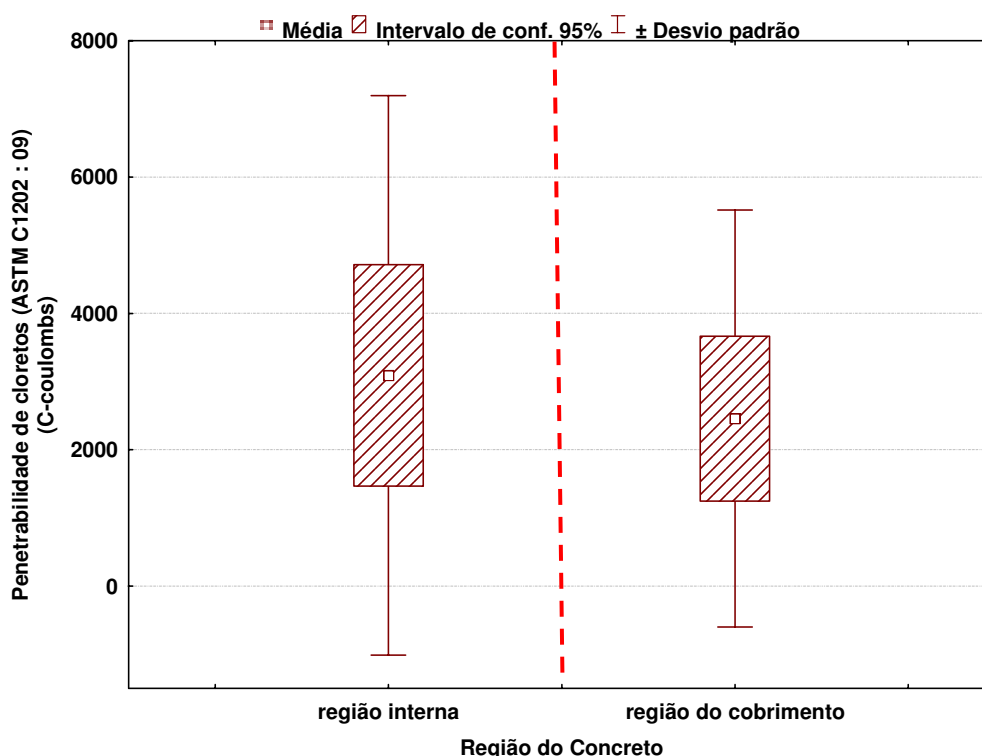


Figura 4.22 - Valores médios globais de penetrabilidade de cloretos em função da região do concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

#### 4.2.5 Ensaio de migração (regime não estacionário)

A Tabela 4.15, a seguir, apresenta os resultados (coeficientes de difusão) dos concretos submetidos ao ensaio de migração em regime estacionário, prescrito pela norma NT BUILT 492 : 1999, e a classificação destes, com base na classificação proposta por GjØrv (2001), que divide os concretos em cinco categorias ( de reduzida a ultra elevada), as quais estão relacionadas com a capacidade dos concretos resistir à penetração de cloretos. Mais detalhes desta proposta de classificação encontram-se na Tabela 2.6 e subitem 2.3.5.3.c. Os resultados individuais estão apresentados no Anexo C.

Tabela 4.14 – Resultados médios de coeficientes de difusão e classificação de acordo com a proposta de Gjrv (2001).

Concreto	Teor de adição(%)	Código	Dnss(x 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)	Classificação quanto a resistncia a penetração de cloretos
			(NT BUILT 492 : 1999)	
Referncia	0	RC35	10,86	Moderada
		RI35	11,09	Moderada
		RC45	22,78	Reduzida
		RI45	27,27	Reduzida
		RC55	44,97	Reduzida
		RI55	46,15	Reduzida
Slica	10	SC35	0,94	Ultra elevada
		SI35	0,90	Ultra elevada
		SC45	1,47	Ultra elevada
		SI45	1,35	Ultra elevada
		SC55	4,81	Muito elevada
		SI55	4,62	Muito elevada
Escória de Alto-forno	50	EC35	2,50	Ultra elevada
		EI35	2,64	Muito elevada
		EC45	5,40	Elevada
		EI45	4,62	Muito elevada
		EC55	9,21	Elevada
		EI55	6,06	Elevada

O menor coeficiente de difusão, considerando a região do cobrimento, foi de  $0,94 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s obtido pelo concreto com adição de slica ativa com relação a/ag 0,35, sendo que o concreto sem adição (referncia), com a mesma relação a/ag e tambm referente a região do cobrimento, obteve um coeficiente de difusão de  $10,86 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s, ou seja, com incremento de apenas 10% de slica ativa foi capaz de reduzir o coeficiente de difusão do concreto em 11 vezes, aproximadamente. Observa-se que o mesmo concreto que teve o melhor resultado por meio do ensaio da ASTM C 1202 : 2009 firmou-se aqui como o melhor concreto.

Considerando de maneira geral, os concretos com adição receberam as melhores classificações, tais como, elevada, muito elevada e ultra elevada, ao contrário, dos concretos de referncia, que receberam as piores classificações, as quais denotam que os concretos sem adição tm uma reduzida e moderada resistncia a penetração de cloretos.

A seguir  apresentada uma abordagem estatstica dos resultados de coeficiente de difusão obtidos atravs do ensaio de migração em regime não estacionário, fundamentada na análise de variância (ANOVA) dos valores de carga passante, conforme apresentado na Tabela 4.16.

Tabela 4.15 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de coeficiente de difusão (ensaio de migração – regime não estacionário) para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.

Efeito	SQ	GL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	Resultado
Modelo	10486,50	17	616,85	384,31	1,93	significativo
Erro (resíduo)	57,78	36	1,61	--	--	--
Total	10544,28	53	--	--	--	--
Tipo de concreto (adição mineral)	6679,92	2	3339,96	2080,83	3,27	significativo
Relação a/g	1916,88	2	958,44	597,12	3,27	significativo
Região do concreto	0,51	1	0,51	0,32	4,12	não significativo
Adição x Relação a/g	1841,50	4	460,38	286,82	2,64	significativo
Adição x Região do concreto	24,13	2	12,06	7,52	3,27	significativo
Relação a/g x Região do concreto	8,28	2	4,14	2,58	3,27	não significativo
Adição x Relação a/g x Região do concreto	15,29	4	3,83	2,38	2,64	não significativo
Erro (resíduo)	57,78	36	1,61	--	--	--

$$R_{\text{mod}} = 0,99 \quad R^2_{\text{mod}} = 0,99$$

Onde:

SQ = Soma dos quadrados; GL = Graus de liberdade; MQ = Média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não;

$R^2_{\text{mod}}$  = Coeficiente de determinação do modelo e

$R_{\text{mod}}$  = Coeficiente de correlação do modelo.

A análise estatística dos resultados mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo, resultando em um valor de  $R^2_{\text{mod}}$  igual a 0,99. A análise mostrou, também, que dos três fatores principais analisados, apenas dois: tipo de concreto (adição) e relação a/ag são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%, evidenciando a influência que cada uma das variáveis independentes exerce no ensaio de migração em regime estacionário, quando tomada isoladamente. Restando apenas a variável região do concreto, que não mostrou-se significativa quando tomada isoladamente.

Tomando-se como base a magnitude dos valores de  $F_{\text{cal}}$ , pode-se constatar que a variável mais influente no ensaio de migração (regime não estacionário) foi o tipo de concreto (adição), seguida de relação a/ag.

Quanto às interações entre as variáveis (fatores), somente as interações duplas mostraram significativas, o que significa que houve uma sinergia dos fatores, tais interações foram entre tipo de concreto (adição) e relação a/ag e entre tipo de concreto (adição) e região do concreto, demonstrando que o efeito que uma variável exerce sobre o ensaio de migração depende da outra variável associada a ela. Cabe salientar, que a última interação demonstrou-se significativa de maneira extremamente inferior do que a primeira interação, tal afirmação pode ser notada através do  $F_{\text{cal}}$  que é bem menor.

Em virtude da influência de duas variáveis (tipo de concreto, relação a/ag) do modelo mostrarem ser estatisticamente significativas, realizou-se a comparação múltipla de médias pelo método de Duncan. Os resultados destas análises estão expostos e discutidos a seguir.

#### 4.2.5.1 Influência da relação água/aglomerante

Na Figura 4.23 são mostrados os valores médios de coeficiente de difusão (regime não estacionário) para cada tipo de concreto (adição) em função da relação a/ag e o resultado do agrupamento de médias está apresentado na Figura 4.24, onde as linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

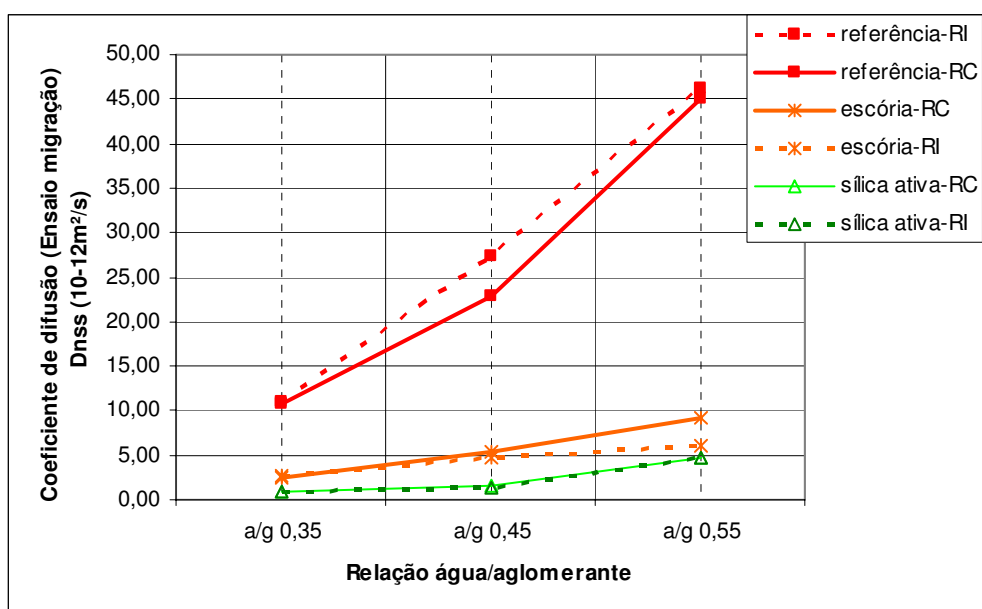


Figura 4.23 – Valores médios de coeficiente de difusão (ensaio de migração - regime não estacionário) para cada tipo de concreto em função da relação a/ag (RI – região interna/RC – região do cobrimento).

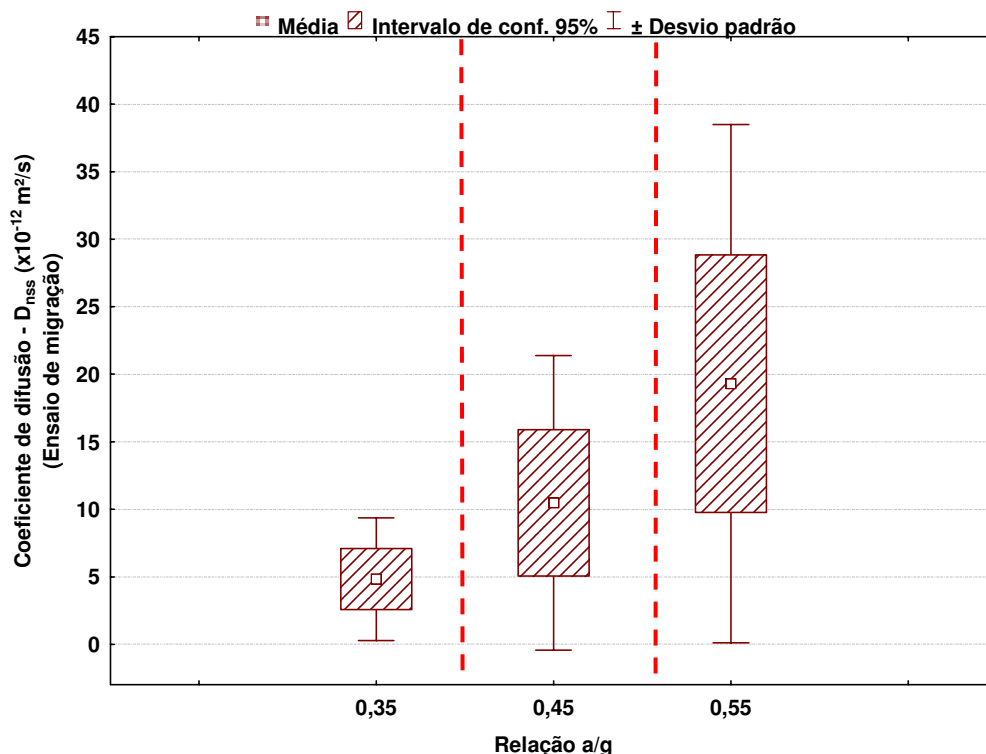


Figura 4.24 - Valores médios globais do coeficiente de difusão (regime não estacionário) em função da relação a/ag, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

Observa-se na Figura 4.24 um comportamento muito bem definido, caracterizado pelo crescimento do valor do coeficiente de difusão com o aumento da relação a/ag. Percebe-se que este comportamento é mais pronunciado no concreto de referência, enquanto que nos concretos com adições este aumento é pouco acentuado (Figura 4.23). Com isso, constata-se um comportamento semelhante o que foi obtido para o ensaio de penetrabilidade de cloretos, conforme ASTM C 1202 : 2009.

#### 4.2.5.2 Influência da adição mineral

Na Figura 4.25 são mostrados, os valores médios globais de coeficiente de difusão para cada tipo de concreto (adição), com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente obtidos através do teste de Duncan.

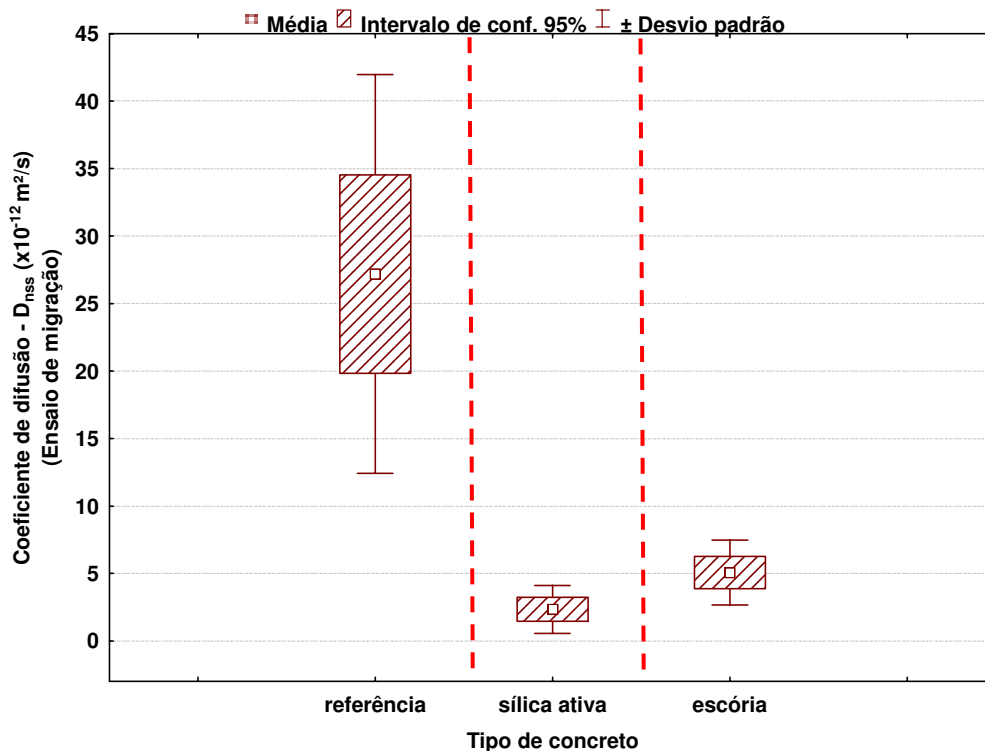


Figura 4.25 - Valores médios globais do coeficiente de difusão (regime não estacionário) em função do tipo de concreto (adição), com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

Percebe-se na Figura 4.25, na qual expõe o resultado global do experimento sob o ponto de vista da análise do tipo de concreto (adição), a tendência geral dos coeficientes de difusão tendeu a reduzir seus valores na seguinte ordem: referência, escória e sílica ativa. Visto que os coeficientes de difusão dos concretos com adições (sílica ativa, escória) são bem menores do que os concretos sem adição (referência). Tal comportamento foi verificado, também, com relação ao ensaio de penetrabilidade de cloretos; diante disso, pode-se afirmar que esses 2 ensaios (penetrabilidade de cloretos por carga passante e migração de cloretos em regime não estacionário) se correlacionam de maneira muito satisfatória, como se pode observar na Figura 4.34, que mostra essa boa correlação, tendo-se um alto coeficiente de determinação ( $r^2$ ), igual a 0,94.

### 4.3 INFLUÊNCIA DA CAMADA CARBONATADA NAS PROPRIEDADES DE TRANSPORTE DE MASSA NO CONCRETO

Neste item, tem-se como objetivo principal verificar o efeito da carbonatação sobre os ensaios que avaliaram os mecanismos de transporte de massa. Além disso, é abordado o comportamento de outras variáveis a fim de compará-las quanto ao seu comportamento que foi descrito no item anterior, quando não se tinha o efeito da carbonatação.

Cabe salientar, novamente, conforme já foi ressaltado no item 3.1, que os concretos considerados para analisar o efeito da carbonatação dizem respeito apenas aos de relação água/aglomerante igual a 0,55. Reforça-se, também, que a carbonatação ocorrida para efeito do estudo em questão foi oriunda de um processo natural, restrita ao período de tempo do programa experimental (aproximadamente 90 dias). Portanto, foi relativamente pequena a espessura média carbonatada dos concretos estudados.

### 4.3.1 Absorção capilar

Na Tabela 4.17 estão apresentados os resultados médios dos ensaios de absorção de água por capilaridade para idade de 84 dias, referente a região do cobrimento e a região interna do concreto. Os resultados individuais estão apresentados no Anexo C.

Tabela 4.16 – Resultados médios de absorção capilar.

Concreto	Teor de adição(%)	Código	Absorção por capilaridade (g/cm <sup>2</sup> )
			(ABNT NBR 9779 : 1995)
Referência	0	RC55	1,47
		RI55	1,56
		RC55N	1,20
		RI55N	1,56
Sílica	10	SC55	0,85
		SI55	1,07
		SC55N	0,71
		SI55N	0,85
Escória de Alto-forno	50	EC55	0,70
		EI55	0,99
		EC55N	0,75
		EI55N	1,12

Na Tabela 4.17 são apresentados os resultados obtidos na análise estatística de variância (ANOVA) dos valores de absorção capilar.

Tabela 4.17 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de absorção capilar, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.

Efeito	SQ	GL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	Resultado
Modelo	2,84	11	0,26	31,73	2,38	significativo
Erro (resíduo)	0,15	18	8,14E-3	--	--	--
Total	2,99	29	--	--	--	--
Tipo de concreto (adição mineral)	2,06	2	1,03	126,62	3,55	significativo
Carbonatação	0,04	1	0,04	5,07	4,41	significativo
Região do concreto	0,44	1	0,43	53,52	4,41	significativo
Adição x Carbonatação	0,10	2	0,05	6,41	3,55	significativo
Adição x Região do concreto	0,03	2	0,01	1,68	3,55	não significativo
Carbonatação x Região do concreto	0,01	1	0,01	1,71	4,41	não significativo
Adição x Carbonatação x Região do concreto	0,04	2	0,02	2,20	3,55	não significativo
Erro (resíduo)	0,15	18	8,14E-3	--	--	--

$R_{\text{mod}} = 0,98$   $R^2_{\text{mod}} = 0,95$

Onde:

SQ = Soma dos quadrados; GL = Graus de liberdade; MQ = Média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não;

$R^2_{\text{mod}}$  = Coeficiente de determinação do modelo e

$R_{\text{mod}}$  = Coeficiente de correlação do modelo.

A análise estatística mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo, a partir da constatação que o valor de  $F_{\text{cal}}$  do modelo é maior que o  $F_{\text{tab}}$ . Além disto, o valor resultante de  $R^2_{\text{mod}}$  foi 0,95.

A análise de variância também mostrou que os efeitos individuais dos fatores principais analisados: tipo de concreto (adição), carbonatação e região do concreto, são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%. Evidenciando a influência de cada uma dessas variáveis independentes, quando tomadas isoladamente.

A variável mais influente na absorção capilar foi o tipo de concreto, em segundo lugar apresentou-se a variável região do concreto e a menor influência foi exercida pela carbonatação. Quanto às interações duplas e a tripla, observa-se a sinergia dos fatores apenas para interação dupla entre o tipo de concreto (adição) e carbonatação, evidenciada pelo resultado estatisticamente significativo dessa interação, demonstrando que o efeito que uma variável exerce sobre a absorção capilar depende da outra variável associada a ela, mesmo de maneira ínfima, pois verifica-se que o  $F_{\text{cal}}$  é um pouco maior que o  $F_{\text{tab}}$ .

Por fim, realizou-se comparação múltipla de médias pelo método de Duncan, em virtude da influência das variáveis: tipo de concreto, carbonatação e região do concreto. Tendo em vista, que os fatores (variáveis) tipo de concreto e região do concreto mantiveram o mesmo

comportamento visto nos subitens 4.2.1.2 e 4.2.1.3, na Figura 4.26 são mostrados, os valores médios globais de absorção capilar para estas variáveis, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

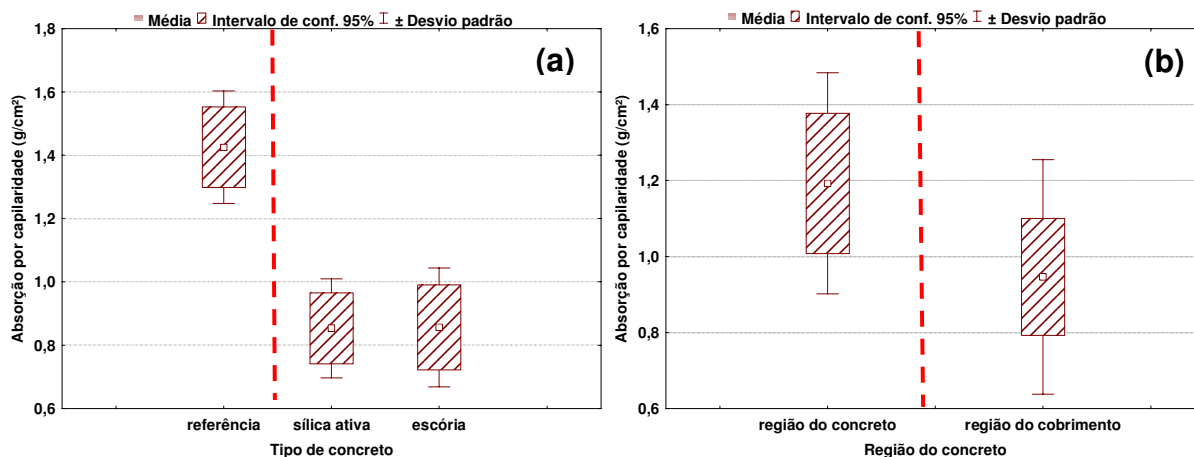


Figura 4.26 – Valores médios globais de absorção capilar: (a) em função relação da água/aglomerante e (b) em função da região do concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

Observa-se na Figura 4.26-a, que os concretos com sílica e escória apresentaram os melhores resultados de absorção capilar, conferindo o que já foi visto na Figura 4.9. Com relação a região<sup>9</sup> do concreto, verifica-se na Figura 4.26-b, que a região do cobrimento apresentou melhores resultados quando comparado com a região interna, conforme foi visto, também, na Figura 4.10.

#### 4.3.1.1 Influência da carbonatação

Na Figura 4.27 são mostrados, os valores médios globais de absorção capilar em função da carbonatação, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente obtidos através do teste de Duncan.

<sup>9</sup> Região do concreto - a provável hipótese que explica a região do cobrimento se comportar melhor que a região interna, encontra-se no item 4.4.

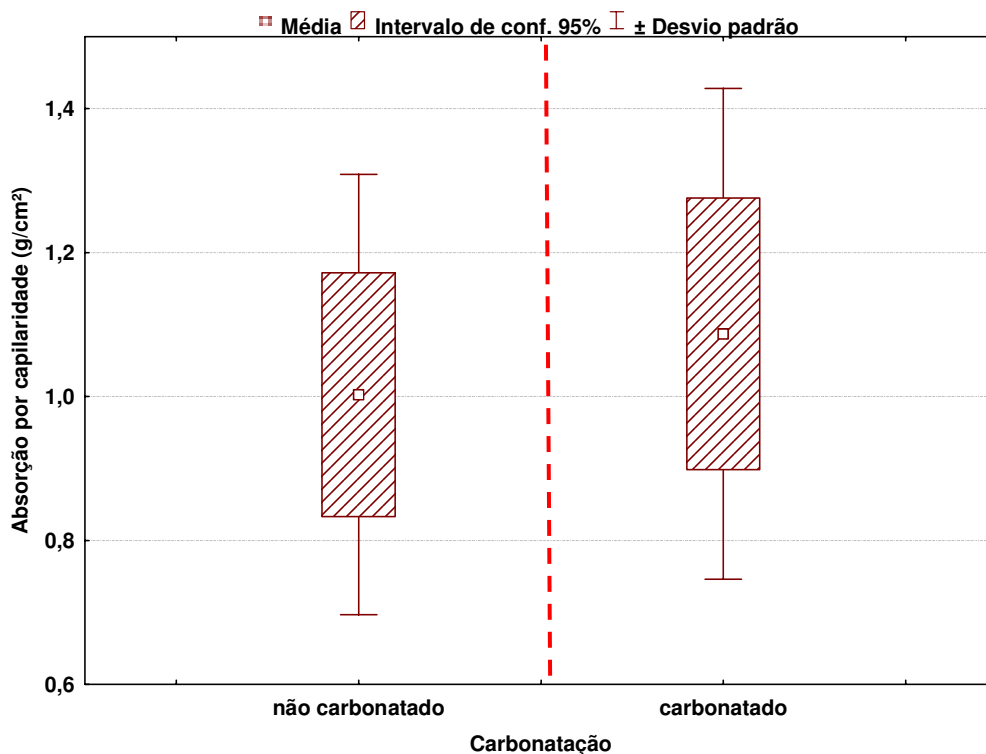


Figura 4.27 – Valores médios globais de absorção capilar em função da carbonatação com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

Constata-se, na Figura 4.27, a existência de dois grupos distintos, significativamente, sendo que os concretos não carbonatados obtiveram uma menor média global, igual a 1,00 g/cm<sup>2</sup>, enquanto os concretos carbonatados obtiveram uma média global um pouco superior, igual a 1,09 g/cm<sup>2</sup>. Embora as médias sejam próximas, a diferença estatística ainda assim é significativa. Isto ocorre em função da intensidade do efeito da carbonatação na propriedade de absorção capilar não ser destacadamente elevada, pois, na análise de variâncias (ANOVA), a diferença entre o valor  $F_{cal}$  e  $F_{tab}$  é apenas suficiente para tornar o efeito significativo, todavia sem destacada intensidade.

Quanto aos maiores resultados apresentados pelos concretos carbonatados, isto pode ser explicado pelo refinamento dos poros por meio da deposição dos carbonatos provenientes da carbonatação, conforme Bier (1987), Holly et al. (1983) e Ngala (1997) defendem. Isto propicia um aumento em termos de pressões capilares, o que, por sua vez, contribui para o aumento da absorção capilar.

### 4.3.2 Permeabilidade ao ar

Na Tabela 4.18 estão apresentados os resultados médios dos concretos submetidos ao ensaio de permeabilidade ao ar com as respectivas classificações quanto a sua permeabilidade, conforme a classificação sugerida por Cather *et al.* (1984).

Tabela 4.18 – Resultados médios de permeabilidade ao ar, com as respectivas classificações conforme a proposta de Cather *et al.* (1984).

Concreto	Teor de adição(%)	Código	Permeabilidade ao ar (segundos)	Classificação	
			(Método de Figg)	Categoria	Interpretação
Referência	0	RC55	178	2	Boa
		RC55N	145	2	Boa
Sílica	10	SC55	374	3	Ótima
		SC55N	222	2	Boa
Escória de Alto-forno	50	EC55	57	1	Moderada
		EC55N	28	0	Pobre

Observa-se que os concretos com adições, quanto as suas classificações diante a permeabilidade ao ar, reduziram em uma categoria no sentido que se compara o concreto carbonatado e não carbonatado. Isto denota que houve uma piora nos resultados de permeabilidade ao ar, quando se considera que o concreto não está parcialmente carbonatado.

Na Tabela 4.19 são apresentados os resultados obtidos na análise estatística de variância (ANOVA) dos valores de permeabilidade ao ar.

Tabela 4.19 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de permeabilidade ao ar, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	Ftab	Resultado
Modelo	3,10E+5	5	62097,14	40,41	2,77	significativo
Erro (resíduo)	27657,25	18	1536,51	--	--	--
Total	3,38E+5	23	--	--	--	--
Tipo de concreto (adição mineral)	2,61E+5	2	1,30E+5	84,85	3,55	significativo
Carbonatação	3,03E+4	1	30317,04	19,73	4,41	significativo
Adição x Carbonatação	1,94E+4	2	9705,54	6,32	3,55	significativo
Erro (resíduo)	27657,30	18	12521,59	--	--	--

$$R_{\text{mod}} = 0,96 \quad R^2_{\text{mod}} = 0,92$$

Onde:

SQ = Soma dos quadrados; GL = Graus de liberdade; MQ = Média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não;

$R^2_{\text{mod}}$  = Coeficiente de determinação do modelo e

$R_{\text{mod}}$  = Coeficiente de correlação do modelo.

A análise estatística mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo, a partir da constatação que o valor de  $F_{cal}$  do modelo é maior que o  $F_{tab}$ . Além disto, o valor resultante de  $R^2_{mod}$  foi 0,92.

A análise de variância também mostrou que os efeitos individuais dos fatores principais analisados: tipo de concreto e carbonatação são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%. Evidenciando a influência de cada uma dessas variáveis independentes, quando tomadas isoladamente.

A variável mais influente na permeabilidade ao ar foi o tipo de concreto, em seguida, apresentou-se a variável carbonatação. Quanto à interação, observa-se a sinergia dos fatores existindo, portanto, uma interação dupla, evidenciada pelo resultado estatisticamente significativo dessa interação, demonstrando que o efeito que uma variável exerce sobre a permeabilidade ao ar depende da outra variável associada a ela.

Por último, realizou-se a comparação múltipla de médias pelo método de Duncan, em virtude da influência das variáveis: tipo de concreto e carbonatação. Inicialmente, na Figura 4.28, são apresentados os valores médios globais de permeabilidade ao ar em função do tipo de concreto, considerando os intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

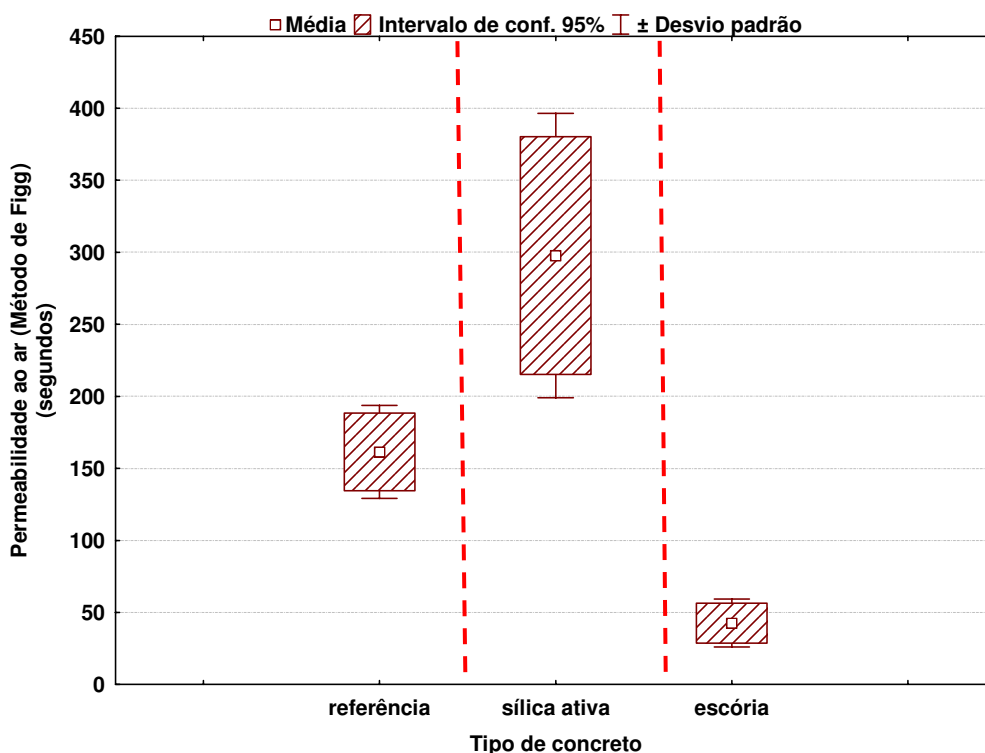


Figura 4.28 – Valores médios globais de permeabilidade ao ar em função do tipo de concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

Verifica-se, na Figura 4.28, que os concretos tiveram comportamento semelhante apresentado no subitem 4.2.2.2 e Figura 4.14, com isso, a justificativa de tal comportamento pode ser a mesma apresentada no subitem 4.2.2.

A seguir, a comparação múltipla de médias pelo método de Duncan, no que diz respeito à influência da carbonatação.

#### 4.3.2.1 Influência da carbonatação

Na Figura 4.29 são mostrados os valores médios globais de permeabilidade ao ar em função da carbonatação, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente obtidos através do teste de Duncan.

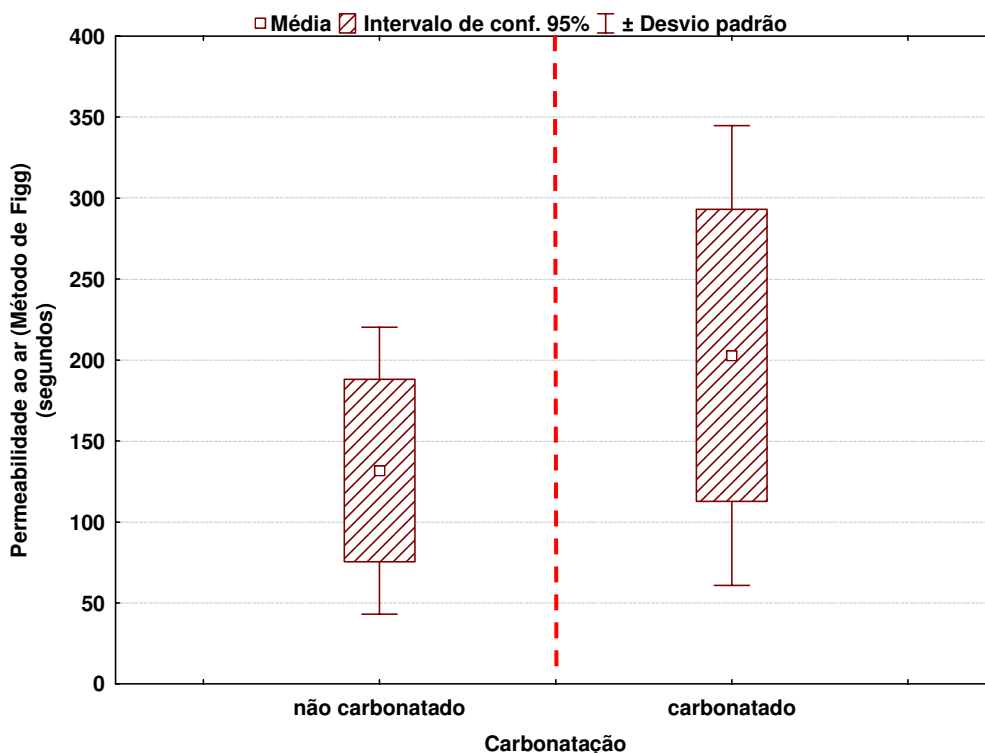


Figura 4.29 – Valores médios globais de permeabilidade ao ar em função da carbonatação, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

Observa-se, na Figura 4.29, que os concretos carbonatados se comportaram de maneira melhor frente a permeabilidade ao ar do que os concretos não carbonatados. Isto se deve, provavelmente, à colmatação dos poros como consequência da carbonatação, conforme relatam Kwon e Song (2007), o que melhorou a permeabilidade superficial do concreto.

### 4.3.3 Penetração de água sob pressão

Na Tabela 4.20 estão apresentados os resultados médios dos concretos submetidos ao ensaio de penetração de água sob pressão, os quais são relativos da região do cobrimento e a região interna do concreto, tanto para a condição carbonatada e não carbonatada. Os resultados individuais estão apresentados no Anexo C.

Observa-se que os valores de penetração de água sob pressão para concretos com relação a/ag igual a 0,55 se enquadram, de maneira geral, exceto os concretos com escória, como impermeáveis, conforme a classificação de Neville (1997) (relatada tanto no subitem 2.2.1.1.a como no subitem 4.2.3). Quanto ao concreto com escória ter apresentado um resultado ruim comparado com os demais, deve-se provavelmente a aparência superficial desprivilegiada, conforme foi discutido no subitem 4.2.2.

Tabela 4.20 – Resultados médios de penetração de água sob pressão.

Concreto	Teor de adição(%)	Código	Penetração de água sob pressão (mm)
			(ABNT NBR 10787 : 1994)
Referência	0	RC55	29,18
		RI55	52,98
		RC55N	30,50
		RI55N	53,33
Sílica	10	SC55	19,85
		SI55	28,99
		SC55N	22,06
		SI55N	21,07
Escória de Alto-forno	50	EC55	70,77
		EI55	55,76
		EC55N	59,66
		EI55N	61,73

Na Tabela 4.21 são apresentados os resultados obtidos na análise estatística de variância (ANOVA) dos valores de penetração de água sob pressão.

A análise estatística mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo, a partir da constatação que o valor de  $F_{cal}$  do modelo é maior que o  $F_{tab}$ . Além disto, o valor resultante de  $R^2_{mod}$  foi 0,96.

A análise de variância também mostrou que os efeitos individuais dos fatores principais analisados: tipo de concreto e região do concreto são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%. Evidenciando a influência de cada uma dessas variáveis independentes, quando tomadas isoladamente.

Quanto às interações duplas e a tripla, observa-se a sinergia dos fatores apenas para uma interação dupla, a qual foi entre tipo de concreto (adição) e região do concreto, evidenciada

pelo resultado estatisticamente significativo, demonstrando que o efeito que uma variável exerce sobre a penetração de água sob pressão depende da outra variável associada a ela.

Tabela 4.21 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de penetração de água sob pressão, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	Ftab	Resultado
Modelo	11299,19	11	1027,20	10,72	2,22	significativo
Erro (resíduo)	2299,52	24	95,81	--		--
Total	13598,71	35	--	--		--
Tipo de concreto (adição mineral)	9128,15	2	4564,08	47,64	3,40	significativo
Carbonatação	22,66	1	22,66	0,24	4,26	não significativo
Região do concreto	444,51	1	444,51	4,64	4,26	significativo
Adição x Carbonatação	22,97	2	11,48	0,12	3,40	não significativo
Adição x Região do concreto	1384,78	2	692,39	7,23	3,40	significativo
Carbonatação x Região do concreto	9,92	1	9,92	0,10	4,26	não significativo
Adição x Carbonatação x Região do concreto	286,20	2	143,10	1,49	3,40	não significativo
Erro (resíduo)	2299,52	24	95,81	--	--	--

$R_{\text{mod}} = 0,98$   $R^2_{\text{mod}} = 0,96$

Onde:

SQ = Soma dos quadrados; GL = Graus de liberdade; MQ = Média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não;

$R^2_{\text{mod}}$  = Coeficiente de determinação do modelo e

$R_{\text{mod}}$  = Coeficiente de correlação do modelo.

Com relação à comparação múltipla de médias pelo método de Duncan, foi realizada apenas das variáveis que se mostraram influenciáveis na penetração de água sob pressão, tais como, tipo de concreto e região do concreto, pois sabe-se que a carbonatação não mostrou-se significativa. Diante disso, na Figura 4.30, são apresentados os valores médios globais de penetração de água sob pressão em função tanto do tipo de concreto (Figura 4.30-a) quanto em função da região do concreto (Figura 4.30-b), considerando os intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

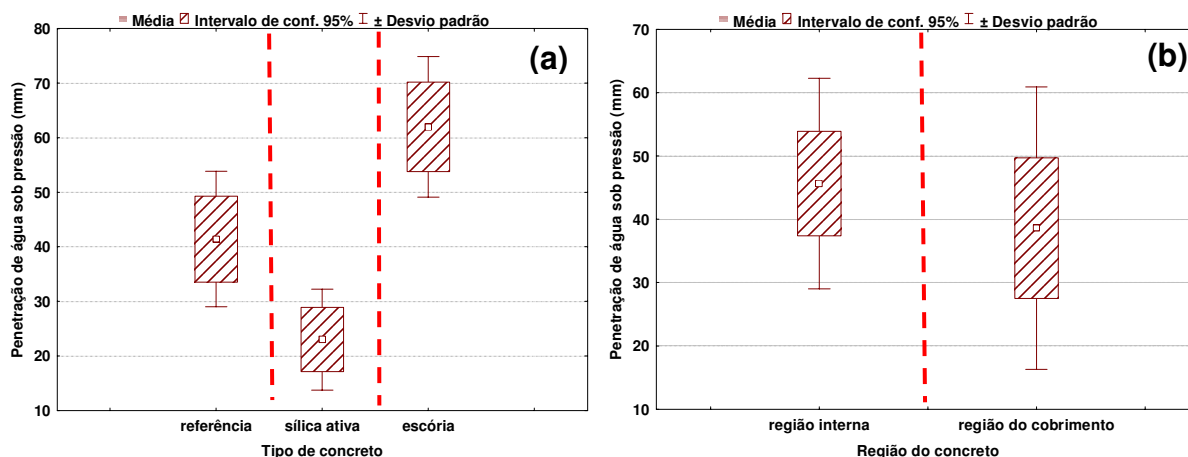


Figura 4.30 – Valores médios globais de penetração de água sob pressão: (a) em função do tipo de concreto, (b) em função da região do concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

Nota-se que o comportamento da penetração de água sob pressão frente às variáveis influenciáveis, manteve o mesmo comportamento já verificado nas Figuras 4.17 e 4.18, com isso, pode-se considerar a mesma justificativa já comentada nos subitens<sup>9</sup>4.2.3.2 e 4.2.3.3.

#### 4.3.4 Penetrabilidade de cloretos

Conforme foi considerado no subitem 4.2.4, os resultados dos ensaios de penetrabilidade de cloretos foram analisados a partir de dois enfoques distintos, primeiramente apresenta-se uma análise de acordo com os critérios de classificação quanto ao risco de penetração de cloretos definidos pela ASTM C 1202 : 2009, conforme mostrado na Tabela 2.5, posteriormente mostra-se e discute-se os resultados com base em uma análise de variância (ANOVA). Os resultados individuais estão apresentados no Anexo C.

Na Tabela 4.22 estão apresentados os resultados médios dos concretos submetidos ao ensaio de penetrabilidade de cloretos, os quais são relativos da região do cobrimento e a região interna do concreto, tanto para a condição carbonatada e não carbonatada. Os resultados individuais estão apresentados no Anexo C.

Tabela 4.22 – Resultados médios de carga passante e classificação de acordo com a ASTM C 1202 : 2009.

Concreto	Teor de adição(%)	Código	Carga passante (C)	ASTM C 1202 : 2009 (classificação)
Referência	0	RC55	9250	Alta
		RI55	11993	Alta
		RC55N	8987	Alta
		RI55N	12342	Alta
Sílica	10	SC55	675	Muito baixa
		SI55	808	Muito baixa
		SC55N	669	Muito baixa
		SI55N	798	Muito baixa
Escória de Alto-forno	50	EC55	1295	Baixa
		EI55	1066	Baixa
		EC55N	1150	Baixa
		EI55N	1218	Baixa

Observa-se que os concretos sem adição (referência) são classificados como tendo alta carga passante, no entanto quando se consideram os concretos com adições, estes reduzem drasticamente a passagem de carga elétrica, denotando uma maior compacidade e menor heterogeneidade na fase sólida do concreto, defendida por tantos pesquisadores, tais como: Metha e Monteiro (1994), Neville (1997) e Dal Molin (2005).

Quanto à diferença dos concretos diante a carbonatação, quando se diz respeito ao mesmo tipo de concreto, verifica-se que as suas classificações se mantêm, ou seja, neste caso a carbonatação não teve o poder de influenciar significativamente a ponto de reduzir a carga passante, tanto é, que a Tabela 4.24 mostra que esta variável não é significativa.

A seguir é apresentada uma abordagem estatística dos resultados de penetrabilidade de cloretos, fundamentada na análise de variância (ANOVA) dos valores de carga passante, conforme apresentado na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de carga passante, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.

Efeito	SQ	GL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	Resultado
Modelo	7,80E+08	11	1,42E+07	135,57	2,22	significativo
Erro (resíduo)	1,70E+07	24	7,05E+05	--	--	--
Total	7,97E+08	35	--	--	--	--
Tipo de concreto (adição mineral)	7,51E+08	2	3,76E+08	532,84	3,40	significativo
Carbonatação	1518,54	1	1518,54	2,2E-03	4,26	não significativo
Região do concreto	9,61E+06	1	9,60E+06	13,63	4,26	significativo
Adição x Carbonatação	4284,76	2	2142,38	3,00E-3	3,40	não significativo
Adição x Região do concreto	1,84E+07	2	9,18E+06	13,01	3,40	significativo
Carbonatação x Região do concreto	2,05E+05	1	2,05E+05	0,29	4,26	não significativo
Adição x Carbonatação x Região do concreto	1,43E+05	2	71326,09	0,10	3,40	não significativo
Erro (resíduo)	1,69E+07	24	7,05E+05	--	--	--
$R_{\text{mod}} = 0,99$ $R^2_{\text{mod}} = 0,98$						

Onde:

SQ = Soma dos quadrados; GL = Graus de liberdade; MQ = Média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não;

$R^2_{\text{mod}}$  = Coeficiente de determinação do modelo e

$R_{\text{mod}}$  = Coeficiente de correlação do modelo.

A análise estatística dos resultados mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo, resultando em um valor de  $R^2_{\text{mod}}$  igual a 0,98. A análise mostrou, também, que somente os efeitos individuais dos fatores principais analisados: tipo de concreto (adição) e região do concreto, são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%, evidenciando a influência que cada uma das variáveis independentes exerce na penetrabilidade de cloretos, quando tomada isoladamente.

Tomando-se como base a magnitude dos valores de  $F_{\text{cal}}$ , pode-se constatar que a variável mais influente na penetrabilidade de cloretos foi o tipo de concreto (adição), em seguida, a região do concreto de maneira bem pequena. Pois se observa que o  $F_{\text{cal}}$  do tipo de concreto é igual a 532,84, o qual extremamente superior ao  $F_{\text{cal}}$  referente a região do concreto que é igual a 13,63.

Quanto às interações entre as variáveis (fatores), somente uma interação dupla mostrou ser significativa, o que significa que houve uma sinergia dos fatores, entre tipo de concreto (adição) e região do concreto, demonstrando que o efeito que uma variável exerce sobre o ensaio de penetrabilidade de cloretos depende da outra variável associada a ela.

A respeito da comparação múltipla de médias pelo método de Duncan, foi realizada apenas das variáveis que se mostraram influenciáveis na penetrabilidade de cloretos, tais como, tipo de concreto e região do concreto, pois sabe-se que a carbonatação não mostrou-se significativa. A par disso, na Figura 4.33, são apresentados os valores médios globais de penetrabilidade de cloretos em função do tipo de concreto e, na Figura 4.31, em função da região do concreto, considerando os intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

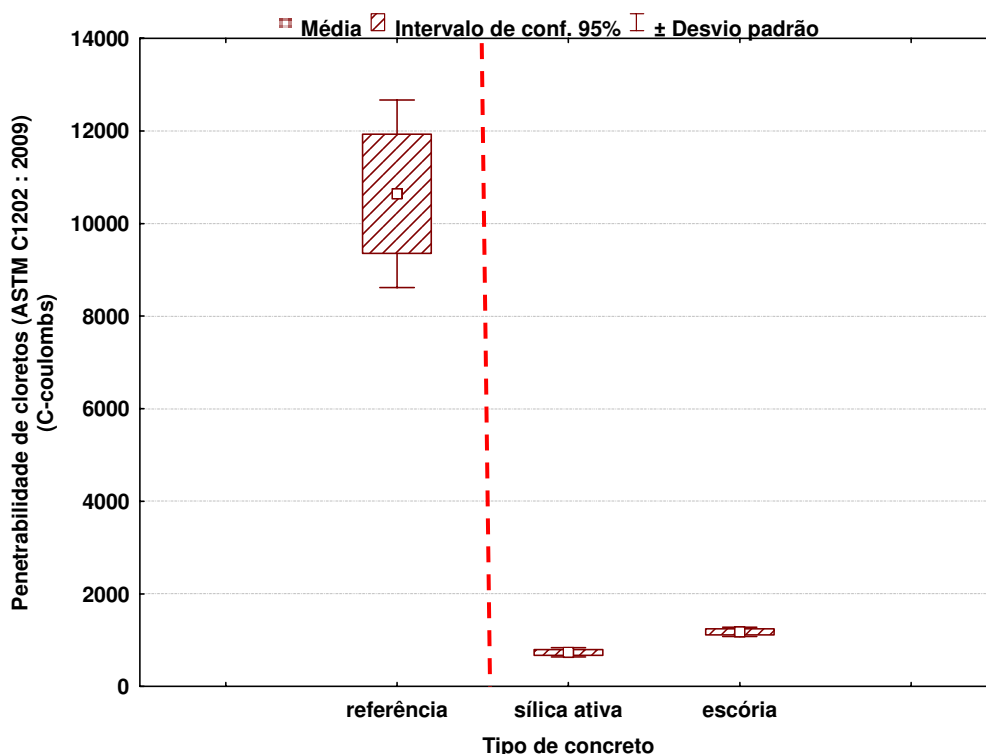


Figura 4.31 – Valores médios globais de penetrabilidade de cloretos em função do tipo de concreto (adição), com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

Nota-se, na Figura 4.31, na qual expõe o resultado global do experimento sob o ponto de vista da análise do tipo de concreto (adição), comprova-se que as adições minerais, mesmo se referindo a concretos com relação  $a/ag$  igual a 0,55, são capazes de reduzir a carga passante. Com relação aos grupos formados, observa-se que os concretos com adições fazem parte do mesmo grupo, diferentemente quando se considerou a variável relação  $a/ag$  no subitem 4.2.4.

Já na Figura 4.32, na qual apresenta o resultado global do experimento sob o ponto de vista da análise da região do concreto, constata-se de forma semelhante visto na Figura 4.22 e no subitem 4.2.4.3, que a região do cobrimento mostrou-se ser melhor que a região interna do concreto.

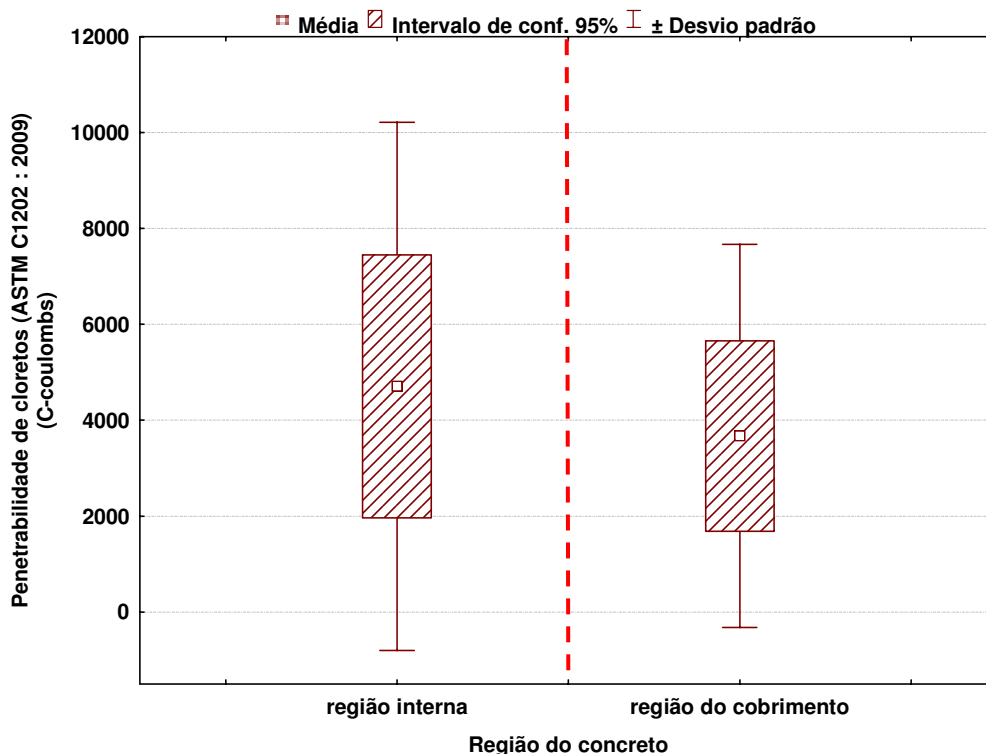


Figura 4.32 - Valores médios globais de penetrabilidade de cloretos em função da região do concreto, com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

#### 4.3.5 Ensaio de migração (regime não estacionário)

A Tabela 4.24, a seguir, apresenta os resultados (coeficientes de difusão) dos concretos submetidos ao ensaio de migração em regime não estacionário, prescrito pela norma NT BUILT 492 : 1999, os quais são relativos da região do cobrimento e a região interna do concreto, tanto para a condição carbonatada e não carbonatada, sendo classificados com base na classificação proposta por Gjrv (2001), que divide os concretos em cinco categorias ( de reduzida a ultra elevada), as quais denotam a capacidade dos concretos resistir a penetração de cloretos, mais detalhes desta proposta de classificação encontra-se na Tabela 2.6 e subitem 2.2.5.3.c. Os resultados individuais estão apresentados no Anexo C.

Tabela 4.24 – Resultados médios de coeficientes de difusão e classificação de acordo com a proposta de Gjrv (2001).

Concreto	Teor de adição	Código	Dnss( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )	Classificação quanto a resistncia a penetração de cloretos
			(NT BUILT 492 : 1999)	
Referncia	0	RC55	44,97	Reduzida
		RI55	46,15	Reduzida
		RC55N	49,80	Reduzida
		RI55N	49,89	Reduzida
Slica	10	SC55	4,81	Muito elevada
		SI55	4,62	Muito elevada
		SC55N	4,32	Muito elevada
		SI55N	4,27	Muito elevada
Escória de Alto-forno	50	EC55	9,21	Elevada
		EI55	6,06	Elevada
		EC55N	4,35	Muito elevada
		EI55N	4,68	Muito elevada

De maneira geral, os concretos com adições receberam as melhores classificações no tocante à resistncia  penetração de cloretos (muito elevada e elevada), ao contrário dos concretos de referncia, que receberam a classificação mais baixa (reduzida). Diante disso, conforme visto tambm para o ensaio de penetrabilidade de cloretos,  possvel melhorar qualitativamente (quanto à durabilidade referente à ação de cloretos), por meio da incorporação de adições minerais, um determinado concreto mantendo-se fixa a relação água/aglomerante ou dentro de uma certa faixa de resistncia  compressão. No presente estudo, foi notrio o aumento da resistncia  penetração de cloretos para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,55 (mantendo-se fixa esta relação).

Com relação  diferena dos concretos diante da carbonatação, quando se trata de um tipo de concreto, verifica-se que as suas classificações se mantm, exceto os concretos com escória de alto-forno, em que houve uma variação nos resultados de modo a denotar que houve uma melhora quando se consideram os concretos sem carbonatação. Isto, porm, não pode ser afirmado categoricamente, pois, estatisticamente, tomado isoladamente, o efeito da carbonatação não se mostrou significativo, conforme mostra ANOVA na Tabela 4.25.

A seguir,  apresentada uma abordagem estatstica dos resultados de coeficiente de difusão obtidos por meio do ensaio de migração em regime não estacionário, fundamentada na análise de variância (ANOVA) dos valores de carga passante, conforme apresentado na Tabela 4.25.

Tabela 4.25 – Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de coeficiente de difusão (ensaio de migração – regime estacionário), para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.

Efeito	SQ	GL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	Resultado
Modelo	14507,45	11	1318,86	1897,06	2,22	significativo
Erro (resíduo)	16,68	24	0,70	--	--	--
Total	14524,13	35	--	--	--	--
Tipo de concreto (adição mineral)	14405,36	2	7202,68	10360,42	3,40	significativo
Carbonatação	0,56	1	0,56	0,80	4,26	não significativo
Região do concreto	0,80	1	0,80	1,15	4,26	não significativo
Adição x Carbonatação	84,34	2	42,17	60,66	3,40	significativo
Adição x Região do concreto	6,40	2	3,20	4,60	3,40	significativo
Carbonatação x Região do concreto	1,59	1	1,59	2,29	4,26	não significativo
Adição x Carbonatação x Região do concreto	8,40	2	4,20	6,04	3,40	significativo
Erro (resíduo)	16,69	24	0,70	--	--	--

$$R_{\text{mod}} = 0,99 \quad R^2_{\text{mod}} = 0,98$$

Onde:

SQ = Soma dos quadrados; GL = Graus de liberdade; MQ = Média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não;

$R^2_{\text{mod}}$  = Coeficiente de determinação do modelo e

$R_{\text{mod}}$  = Coeficiente de correlação do modelo.

A análise estatística dos resultados mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo, resultando em um valor de  $R^2_{\text{mod}}$  igual a 0,98. A análise mostrou, também, que dos três fatores principais analisados, apenas o tipo de concreto (adição) é estatisticamente significativo a um nível de confiança de 95%, evidenciando a influência que esta variável exerce no ensaio de migração em regime estacionário, quando tomada isoladamente.

Tomando-se como base a magnitude dos valores de  $F_{\text{cal}}(10360,42 >> 3,30)$ , pode-se constatar que a variável tipo de concreto foi muito influente no ensaio de migração (regime não estacionário).

Quanto às interações entre as variáveis (fatores), tiveram duas interações duplas e uma tripla que mostraram significativas, o que significa que houve uma sinergia dos fatores. As interações duplas foram entre tipo de concreto (adição) e carbonatação e entre tipo de concreto (adição) e região do concreto e a interação tripla englobou todos os fatores (tipo de concreto, carbonatação, região do concreto), demonstrando que o efeito que uma variável exerce sobre o ensaio de migração depende da outra variável associada a ela. Nota-se, com isso, que a carbonatação tomada isoladamente não foi significativa, mas quando se considera juntamente com tipo de concreto o seu efeito torna-se importante, a tal ponto, que

esta interação pode-se dizer importante, pois seu  $F_{cal}$  foi o maior das interações significativas apresentadas.

Quanto à comparação múltipla de médias pelo método de Duncan, foi realizada apenas da variável tipo de concreto que se mostrou influenciável no ensaio de migração (estado não estacionário). Diante disso, na Figura 4.35, são apresentados os valores médios globais de coeficiente de difusão<sup>10</sup> em função do tipo de concreto. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

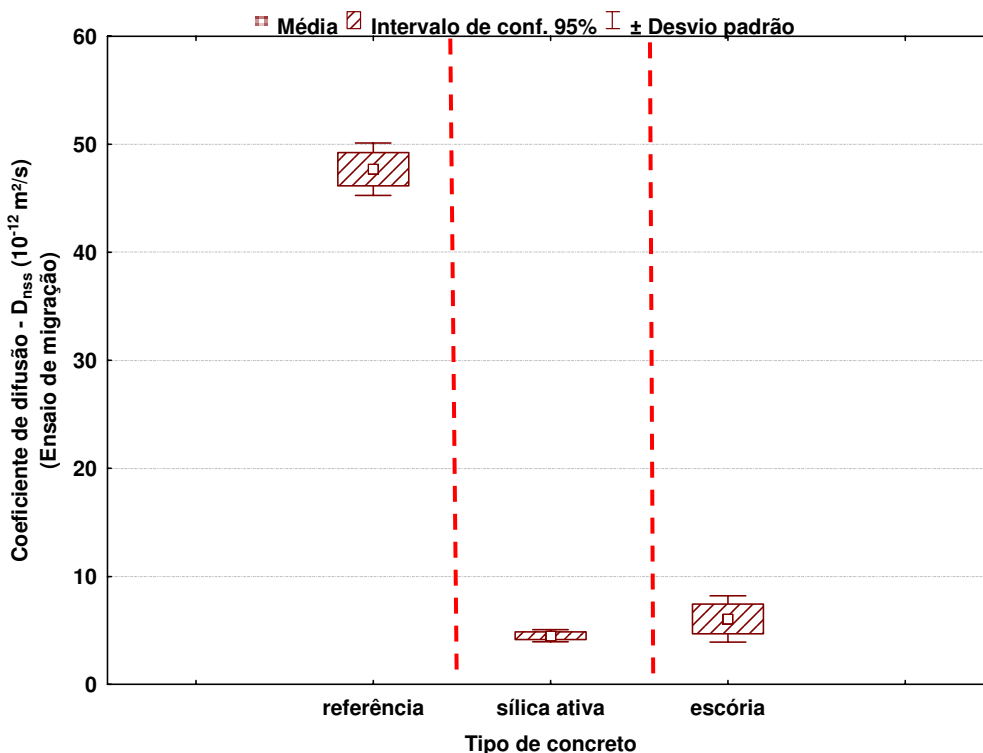


Figura 4.33 - Valores médios globais do coeficiente de difusão (regime não estacionário) em função do tipo de concreto (adição), com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

Na Figura 4.33, comprova-se, mais uma vez, conforme visto na Figura 4.25 no subitem 4.2.5.2, que as adições no concreto influenciam fortemente no coeficiente de difusão de cloretos, no sentido de torná-lo mais resistente à penetração de cloretos.

<sup>10</sup> Coeficiente de difusão – obtida através do ensaio de migração no regime não estacionário.

#### 4.4 DISCUSSÃO GLOBAL DOS RESULTADOS

Neste item é feita uma discussão global dos resultados apresentados anteriormente. Inicialmente, discutem-se os efeitos das variáveis (relação água/aglomerante, tipo de concreto (adição), região do concreto e a carbonatação) frente às propriedades de transporte de massa, incluindo algumas correlações entre os ensaios utilizados. Por fim, são avaliados os concretos que obtiveram os melhores desempenhos frente às propriedades e condições da presente pesquisa.

A influência da variável relação água/aglomerante foi notada em todas as propriedades estudadas, as quais foram verificadas nos ensaios de absorção capilar, permeabilidade ao ar, penetração de água sob pressão, penetrabilidade de cloretos e o ensaio de migração de cloretos no regime estacionário. Sendo que cada uma das três relações a/ag consideradas neste estudo, para todos os ensaios, produziu efeitos particularizados (diferentes estatisticamente), conforme as análises pelo método de Duncan. Já se esperava a influência desta variável, pois vários autores, tais como Mehta e Monteiro (1994), Neville (1997) e Aïtcin (2000), a consideram como o principal parâmetro controlador da porosidade do concreto que, por sua vez, reflete-se nos valores das propriedades ligadas aos mecanismos de transporte, uma vez que ao reduzir a relação a/ag há uma diminuição na quantidade de vazios do concreto. A rigor, o decréscimo da relação a/ag implica em uma alteração física da pasta de cimento, mediante uma redução quantitativa do seu volume de poros e uma melhoria qualitativa da estrutura interna do concreto.

Com relação ao tipo de concreto (adições minerais), de modo geral, o emprego de adições minerais como a sílica ativa e a escória de alto-forno, propiciaram melhoria no comportamento de praticamente todas as propriedades avaliadas neste estudo.

Em particular, podem ser destacados os excelentes resultados dos concretos com adições minerais no que tange à penetração de cloretos, avaliados por meio dos ensaios de penetrabilidade de cloretos (ASTM C 1202 : 2009) e de migração de cloretos (regime não estacionário). Tais resultados mostraram que o emprego das adições minerais foi mais relevante do que a redução da relação água/aglomerante. O comportamento desses dois ensaios, que avaliaram a resistência à penetração de cloretos, foi muito similar, de modo que uma regressão linear pôde ser obtida, conforme mostrado na Figura 4.34. Nesta figura consta a equação de regressão e o coeficiente de determinação ( $r^2$ ), que foi igual 0,94, portanto bastante elevado, o que ressalta a potencialidade do ensaio de penetrabilidade de cloretos como ensaio alternativo para se ter uma estimativa do coeficiente de difusão (migração - regime não estacionário) de maneira rápida e menos trabalhosa, tendo em vista

que esse ensaio tem duração de 6 horas, enquanto no ensaio de migração de cloretos a duração é da ordem de 24 horas.

Considerando, ainda, as relações entre os mecanismos de transporte estudados, foi possível relacionar os ensaios referente a penetração de cloretos com o ensaio de absorção capilar, obtendo regressões do tipo exponencial, conforme mostrado nas Figuras 4.35 e 4.36.

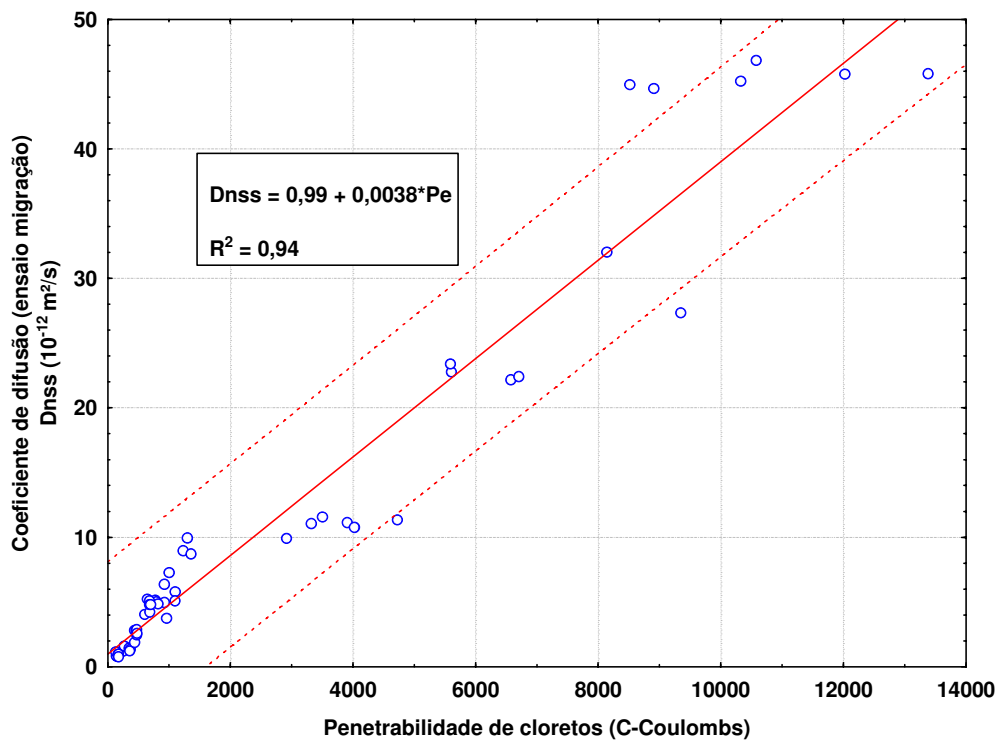


Figura 4.34 – Correlação entre os dados individuais de coeficiente de difusão (ensaio de migração – regime não estacionário) e os dados individuais das cargas passantes de penetrabilidade de cloretos.

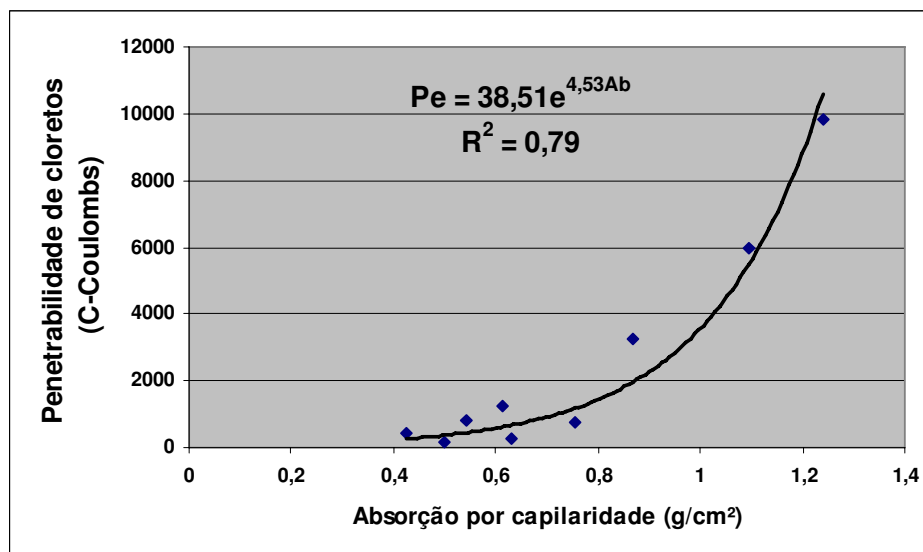


Figura 4.35 – Regressão tipo exponencial entre os resultados médios da região do cobrimento de penetrabilidade de cloretos e absorção por capilaridade.

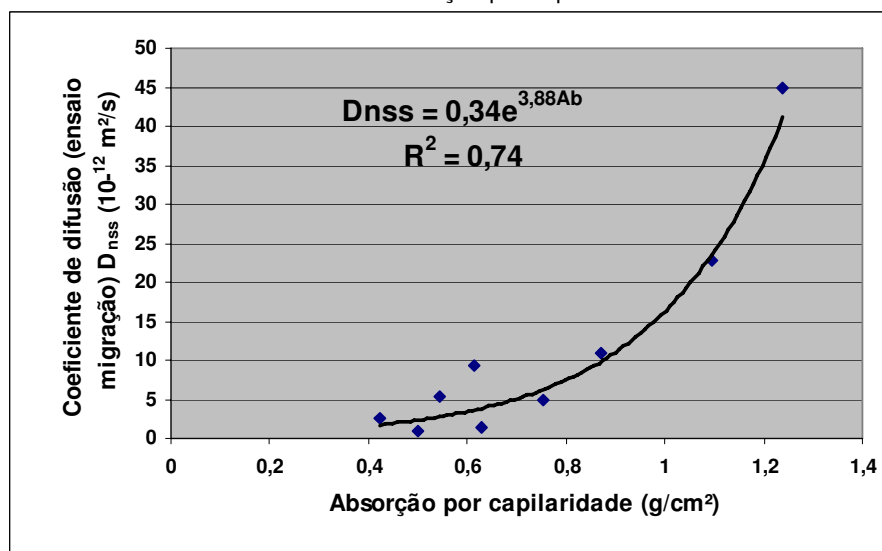


Figura 4.36 – Regressão tipo exponencial entre os resultados médios da região do cobrimento do coeficiente de difusão (ensaio de migração – regime não estacionário) e absorção por capilaridade.

O fato de mecanismos de transporte tão distintos, relacionados nas Figuras 4.35 e 4.36, apresentarem correlação entre eles, provavelmente tem sua explicação no sistema de poros. Em especial para os concretos com adições, os poros refinados e com tortuosidade típica aproximam as formas como se dão as variações de penetração de cloretos por migração elétrica e as variações de sucção capilar de água, para os vários concretos.

Voltando a discutir a influência do tipo de concreto, observou-se que somente nas propriedades associadas aos mecanismos de permeabilidade (ao ar e à água) os concretos com escória de alto-forno apresentaram os piores resultados, conforme apresentado e discutido no subitem 4.2.2. Uma explicação que se pode ter para tais resultados, em especial para o ensaio de permeabilidade ao ar, diz respeito às características de

acabamento superficial do concreto com escória de alto-forno. Como referido, esse ensaio avalia uma camada bastante superficial do concreto e tendo em vista o concreto de escória ter produzido uma superfície com textura superficial muito irregular (advinda, provavelmente, de uma eminência de exsudação, conforme a Figura 4.37), isto pode ter afetado negativamente a propriedade avaliada. Diante disso, constata-se que qualificar o concreto com relação à sua durabilidade por meio de uma única propriedade de mecanismo de transporte, não é recomendável. Quanto a isso, Leão *et al.* (2001) ressaltam a importância de se comparar os resultados de permeabilidade ao ar com outras propriedades com a finalidade de conferir um maior respaldo às conclusões sobre um determinado concreto.



Figura 4.37 – Concreto de escória no estado fresco mostrando o seu aspecto superficial irregular.

Tendo em vista que os dois ensaios (permeabilidade ao ar e penetração de água sob pressão) considerados para avaliar a permeabilidade apresentaram comportamentos semelhantes, foi possível obter correlação entre eles. Primeiramente, obteve-se uma regressão tipo exponencial, conforme a Figura 4.38, na qual consta a equação da regressão e o coeficiente de determinação que foi igual a 0,71. Retirando os concretos sem adição mineral, que estão circunscritos na Figura 4.38, foi possível melhorar o coeficiente de determinação para 0,87, de acordo com a Figura 4.39. Também aqui, o sistema de poros refinados dos concretos com adições pode ter contribuído para tornar correlacionáveis as duas variáveis em questão, partindo-se do pressuposto de que, naturalmente, já existe certa similaridade entre os dois mecanismos de transporte (permeabilidade ao ar e à água).

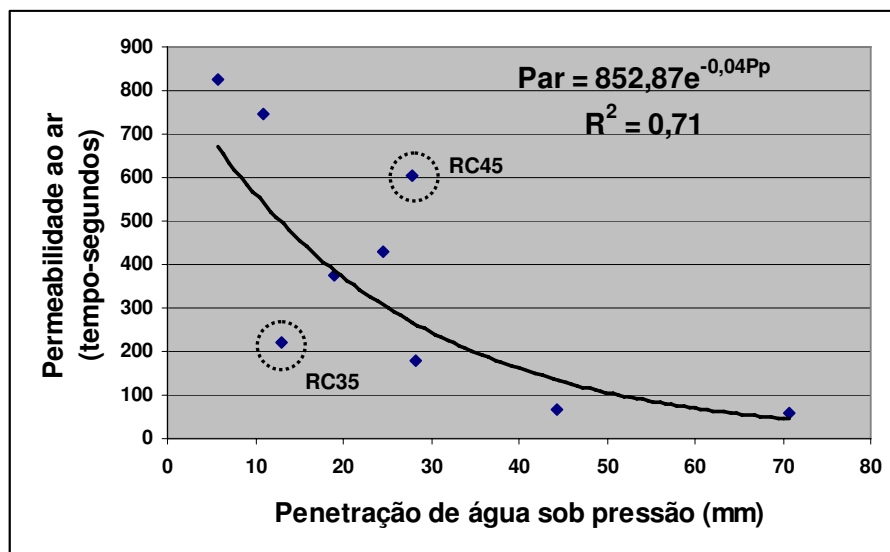


Figura 4.38 -. Regressão tipo exponencial entre os resultados médios da região do cobrimento de permeabilidade ao ar e penetração de água sob pressão.

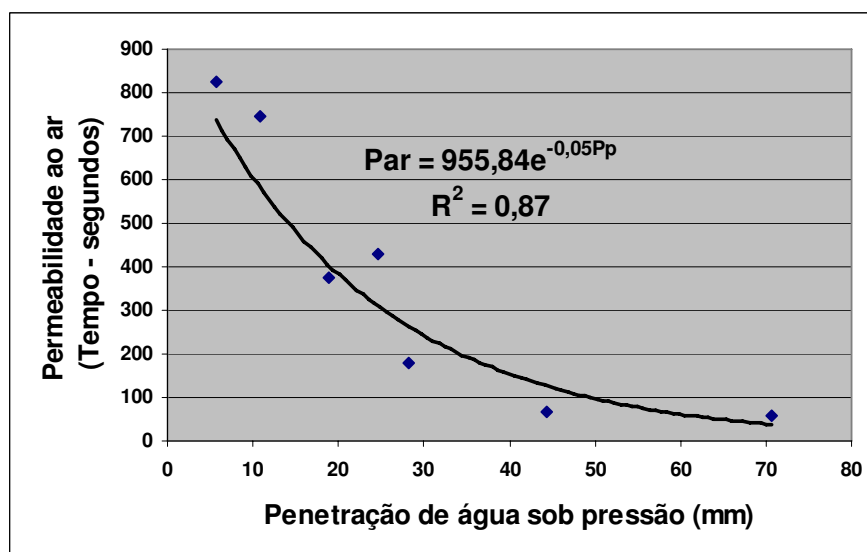


Figura 4.39 -. Regressão tipo exponencial entre os resultados médios da região do cobrimento de permeabilidade ao ar e penetração de água sob pressão (desconsiderando os concretos sem adição das relações a/ag igual a 0,35 e 0,45).

Quanto à influência da região do concreto, os ensaios que identificaram este efeito foram: absorção por capilaridade, penetração de água sob pressão e penetrabilidade de cloretos. Segundo afirmam Silva (1995) e Basheer e Nolan (2001), existe um gradiente de porosidade na camada superficial do concreto, diminuindo a porosidade no sentido da camada da superfície à parte interna do concreto; com isso, espera-se que a região superficial seja mais suscetível a entrada de massa (fluidos, gases). No entanto, verificou-se no presente estudo justamente o contrário, ou seja, a região do cobrimento se comportou melhor do que a região interna do concreto. Diante disso, pode-se levantar uma hipótese, a saber: ao se

avaliar a parte interna do concreto, em virtude do corte do corpo-de-prova, tem-se uma frente exposta constituída por várias zonas de transição (zona de interface - pasta/agregado), que, por sua vez, facilitam a entrada de fluidos, gases e íons. Por outro lado, é possível que a camada de argamassa formada em contato com a fôrma tenha alguma função adicional de proteção, uma vez que cobre as zonas “abertas” de interface pasta/agregado (conforme comentário anterior) ressaltando, assim, o lado “positivo” do efeito parede. De toda maneira, necessita-se de maior investigação para a verificação dessa hipótese e para um maior entendimento de toda a questão.

Considerando o efeito da carbonatação, observou-se que algumas propriedades o identificaram, tais como: absorção por capilaridade e permeabilidade ao ar. No primeiro caso, notou-se que a carbonatação influencia no sentido de aumentar a absorção capilar, podendo isto ser explicado, conforme relatado no subitem 4.3.1.1, pelo estreitamento dos poros da superfície, que aumenta a força capilar, provocando, assim, maior absorção. Já no segundo caso, a carbonatação do concreto contribuiu para reduzir a permeabilidade superficial do concreto, haja vista que, por consequência da colmatação dos poros, há uma dificuldade maior para a passagem de gases na superfície. Tal efeito já é conhecido para a permeabilidade ao ar, conforme discussão realizada por Cather *et al.* (1984), entre outros.

Por fim, com base nas análises feitas, confirmou-se que os concretos com adições minerais, apresentaram os melhores resultados frente as propriedades de transporte de massa, o que significa dizer que os agentes agressivos terão uma maior dificuldade de adentrarem nestes concretos.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

#### 5.1 CONCLUSÕES

Com base no programa experimental desta pesquisa, são apresentadas, neste item, as principais conclusões obtidas.

- A influência da variável relação água/aglomerante foi notada em todas as propriedades estudadas no presente trabalho relacionadas com os mecanismos de transporte de massa, confirmando a relação água/aglomerante como um fator muito importante na definição da porosidade, já que ela se reflete de maneira decisiva nessas propriedades de transporte de massa, uma vez que ao reduzir-se a relação a/ag há uma diminuição na quantidade de vazios do concreto.
- Com relação ao tipo de concreto (adições minerais), de modo geral, o emprego de sílica ativa e escória de alto-forno propiciou melhoria no comportamento de praticamente todas as propriedades avaliadas neste estudo, o que pode ser explicado pelo refinamento dos poros que as adições minerais conferem ao concreto, o que normalmente torna esses poros mais desconectados e tortuosos, dificultando assim o ingresso de fluidos, gases e íons. Em especial, ressalta-se a capacidade da escória de alto-forno na fixação de cloretos, embora não tenha sido este aspecto avaliado no trabalho.
- Com relação à permeabilidade, que foi avaliada por meio dos ensaios de permeabilidade ao ar e penetração de água sob pressão, os concretos com escória de alto-forno apresentaram o pior comportamento frente a essa propriedade. Uma explicação que se pode ter para tal comportamento, em especial para o ensaio de permeabilidade ao ar, diz respeito às características de acabamento superficial do concreto com escória de alto-forno. Como o referido ensaio avalia uma camada bastante superficial do concreto e tendo em vista o concreto de escória ter produzido uma superfície com textura superficial muito irregular, isto pode ter afetado negativamente a propriedade avaliada.
- Quanto à absorção capilar, os concretos com adições minerais se comportaram melhor que os concretos sem adição mineral, confirmando que o emprego de adições minerais confere uma maior compacidade à estrutura interna do concreto, o que, por sua vez, beneficiou, também, a propriedade de absorção por capilaridade.

- Os benefícios observados com a incorporação das adições minerais são mais pronunciados nos ensaios que avaliam a penetrabilidade de cloretos, com reduções drásticas na penetrabilidade de cloretos e no coeficiente de difusão (migração – não estacionário), a ponto de reduzir, de maneira geral e aproximada, 11 vezes o coeficiente de difusão em concretos, quando se emprega adição de sílica ativa e escória de alto-forno, especialmente para os concretos com relação a/ag igual a 0,55.
- Observou-se que no ensaio de penetrabilidade de cloretos (ASTM C 1202), os concretos com adições de escória de alto-forno e sílica ativa se mantiveram na classificação de carga passante (da ASTM C 1202) “muito baixa”, ao contrário do concreto sem adição (referência), cuja classificação de carga passante foi “alta”.
- Com base nas análises feitas, confirmou-se que os concretos com adições minerais apresentaram os melhores resultados frente as propriedades de transporte de massa, o que significa dizer que os agentes agressivos terão uma maior dificuldade de adentrarem nestes concretos, mesmo em concretos com relação água/aglomerante igual a 0,55.
- Quando se trata de interação entre as variáveis (fatores), se quer verificar se há uma sinergia dos fatores (variáveis) frente uma propriedade. Sabendo disso verificou-se que houve interação da relação água/aglomerante e tipo de concreto nos ensaios de permeabilidade ao ar, penetração de água sob pressão, penetrabilidade de cloretos e o ensaio de migração (não estacionário). A interação entre tipo de concreto e região do concreto foi significativa para os ensaios de penetração de água sob pressão, penetrabilidade de cloretos e o ensaio de migração. Por fim, tratando-se da interação entre relação água/aglomerante e região do concreto, observou-se que em nenhuma propriedade ela apresentou-se significativa.
- Considerando o efeito da carbonatação, observou-se que algumas propriedades o identificaram, tais como, a absorção por capilaridade e a permeabilidade ao ar. No primeiro, notou-se que a carbonatação propicia o aumento da absorção capilar, que pode ser explicado pelo estreitamento dos poros da superfície, o qual pode aumentar a força capilar provocando, assim, uma maior absorção. Já no segundo, a carbonatação do concreto reduz a permeabilidade superficial do concreto, em consequência da colmatação dos poros, dificultando, desse modo, a passagem de gases da superfície para o interior do material.
- Tratando-se da interação entre o efeito da carbonatação com as variáveis: tipo de concreto e região do concreto. Notou-se que houve interação entre tipo de concreto e carbonatação apenas no ensaio de permeabilidade ao ar. Quanto à interação entre a região

do concreto e a carbonatação, identificou-a somente no ensaio de migração. E neste mesmo ensaio foi identificada a interação tripla (relação água/aglomerante x tipo de concreto x carbonatação).

- Foi possível estabelecer correlações, com coeficientes de determinação satisfatórios ( $R^2 \geq 0,74$ ), para penetrabilidade de cloretos e coeficiente de difusão (migração – regime não estacionário), relacionando com a absorção capilar.
- Obteve-se correlação entre os ensaios que avaliaram a permeabilidade do concreto: permeabilidade ao ar (Método de Figg) e penetração de água sob pressão. Apresentando um coeficiente de determinação igual a 0,71; o qual foi melhorado para 0,87, quando se retirou os resultados dos concretos RC35 e RC45. Este melhoramento no coeficiente de determinação pode ser explicado pela menor heterogeneidade da fase sólida dos concretos com adição mineral que, por sua vez, conferem uma menor dispersão nos resultados de mecanismo de transporte, pois sabe-se que uma microestrutura mais consolidada e organizada é menos suscetível a variação das influências externas (umidade, temperatura etc). Por fim, o sistema de poros refinados dos concretos com adições pode ter contribuído para tornar mais correlacionáveis as duas variáveis em questão, partindo-se do pressuposto de que, naturalmente, já existe certa similaridade entre os dois mecanismos de transporte (permeabilidade ao ar e à água).
- Foi possível correlacionar os ensaios de penetrabilidade de cloretos (ASTM C 1202:2009) e o de migração de cloretos em regime não estacionário (NT BUILT 492 : 1999) com coeficiente de determinação de regressão ( $r^2$ ) igual a 94%. Portanto, mostra-se uma tendência, a qual sendo confirmada para uma gama maior de outros tipos de concreto, a partir daí, poderia se optar pelo ensaio de penetrabilidade de cloretos como ensaio alternativo para se ter uma estimativa do coeficiente de difusão (migração - regime não estacionário) de maneira rápida e menos trabalhosa, tendo em vista que o ensaio da ASTM C 1202:2009 tem uma duração de 6 horas, enquanto, que o ensaio por migração de cloretos, em geral, a duração do ensaio consiste em 24 horas.
- Verificou-se no presente estudo, que a região do cobrimento revelou se comportar melhor do que a região interna do concreto. Diante disso, pode-se levantar uma hipótese, a saber: ao se avaliar a parte interna do concreto, em virtude do corte do corpo-de-prova, tem-se uma frente exposta constituída por várias zonas de transição (zona de interface - pasta/agregado), que, por sua vez, facilitam a entrada de fluidos, gases e íons. Por outro lado, é possível que a camada de argamassa formada em contato com a fôrma tenha alguma função adicional de proteção, uma vez que cobre as zonas “abertas” de interface

pasta/agregado (conforme comentário anterior) ressaltando, assim, o lado “positivo” do efeito parede. De toda maneira, necessita-se de maior investigação para a verificação dessa hipótese e para um maior entendimento de toda a questão. Por fim, os ensaios que identificaram o efeito da região do concreto foram: absorção por capilaridade, penetração de água sob pressão e penetrabilidade de cloretos.

## 5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observou-se na presente pesquisa alguns resultados inesperados, a saber:

- *o revestimento do concreto apresentou melhor comportamento quando comparado com a região interna nas propriedades relacionadas aos mecanismos de transporte de massa;*
- *o concreto com escória de alto-forno apresentou resultados não satisfatórios frente aos ensaios que avaliaram a permeabilidade do concreto, tais quais, permeabilidade ao ar e penetração de água sob pressão.*

Diante desses resultados, a seguir estão colocadas algumas considerações importantes, a fim de consolidar e tornar mais claros alguns pontos do trabalho, por meio de futuros estudos.

Inicialmente, quanto ao resultado referente à região do concreto, recomenda-se que sejam realizados mais estudos no intuito de verificar se realmente a região interna do concreto se comporta de maneira inferior ao revestimento. Caso tal comportamento se confirme, resta ainda identificar se os resultados apresentados pela região interna do concreto estão relacionados, de maneira inequívoca, com a exposição dos agregados. No presente estudo, em princípio, considerou-se essa exposição decorrente do corte do concreto como causadora de uma frente exposta de várias zonas de transição (zona de interface - argamassa/agregado), o que, por sua vez, pode ter facilitado o transporte de massa.

Com relação ao concreto com escória de alto-forno, este apresentou aparência superficial irregular quando comparado com outros tipos de concreto, sendo essa sua pior aparência superficial responsabilizada pelos resultados não satisfatórios frente à propriedade de permeabilidade do concreto. Diante disso, tentando obter uma explicação mais convincente a respeito do desempenho ruim desse concreto frente a esta propriedade de transporte de massa, sugere-se, a partir de novos estudos, observar a moldagem desse tipo de concreto (relacionado com a ordem de inserção dos materiais na betoneira), verificando se existe

alguma interação do aditivo superplastificante à base de policarboxilato com a escória de alto-forno e, por fim, se há alguma relação com a finura da escória de alto-forno.

### **5.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

A presente pesquisa evidenciou alguns aspectos que merecem estudos mais aprofundados, referentes ao fenômeno da carbonatação e das metodologias aplicadas, sendo assim, sugere-se para os futuros trabalhos:

- aprofundamento da pesquisa do sistema de poros dos diversos concretos, mediante o emprego das técnicas de porosimetria por intrusão de mercúrio e porosimetria por dessorção de vapor de água, para avaliar principalmente as diferentes regiões do concreto;
- avaliar a permeabilidade a água dos concretos, considerando o método de Figg, como sugestão, a norma portuguesa prescrita pela E LNEC E413 (1993), a qual descreve o ensaio de maneira sucinta com facilidade de implementação e execução;
- correlacionar o ensaio de migração (regime não estacionário) proposto por Tang e Nilsson (1992) com o ensaio de difusão por imersão;
- avaliar as propriedades de transporte de massa consideradas neste estudo, em concretos submetidos a carbonatação acelerada;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFPC. DURABILITE DES BETONS. Determination de la masse volumique apparente et de la porosite accessible a l'eau. Mode operatoire recommande. [s.l.]. [s.n.].

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. 1ªed. São Paulo: Pini, 2000.667p.

ANDRADE,C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 724 – 742, 1993.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. Porto Alegre, 2001. 277 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORT OFFICIALS – ASSHTO. Standard method of test for resistance of concrete to chloride ion penetration. **AASHTO T 259**. Washington, USA, 1980.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration – C 1202 – 09. **Annual Book of ASTM Standard**, v.04.02., p.589- 598, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**. Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolana com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6153**. Produto metálico - Ensaio de dobramento semi-guiado . Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6467**. Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**. Agregado para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**. Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão da Argamassa. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**. Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**. Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680**. Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto; especificação. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**. Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio . Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**. Concreto: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade, deformação e de curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e Concreto endurecidos - Determinação da absorção de água capilar, Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**. Concreto fresco: Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9936**. Agregados - Determinação do teor de partículas leves . Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10787**: Concreto endurecido - Determinação da penetração de água sob pressão, Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10908**. Aditivos para argamassa e concretos – Ensaio de uniformidade. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**. Cimento Portland – Finura por Meio da Peneira 75 Micrometros (ABNT Nº 200) - Determinação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11580**. Determinação da água de consistência. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**. Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier . Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**. Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**. Preparo, controle e recebimento do concreto com foco na durabilidade. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12826**. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos: especificação. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**. Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto: Ensaio de compressão de corpo-de-prova cilíndrico. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 47**. Concreto: Determinação do teor de ar em concreto fresco. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e Concreto endurecidos - Determinação da absorção de água capilar, Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10786**: Concreto endurecido - Determinação Coeficiente de permeabilidade à água, Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10787**: Concreto endurecido - Determinação da penetração de água sob pressão, Rio de Janeiro, 1994.

CABRAL, A. E. B. **Avaliação de sistemas de reparo utilizados em estruturas atacadas por cloretos, através da resistência de polarização**. Porto Alegre, 2000. 161p. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CABRERA, J. G.; HASSAN, K. E. An **Accelerated Method for Measuring the Effective Chloride Diffusion Coefficient of Concrete**. In: Durability of Concrete – Fourth CANMET/ACI International Conference. Proceedings. Sydney – Australia, 1997, v.2, p.1551 – 1575.

BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D. J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. **Construction and Building Materials**. v. 15, n. 2-3, p. 93-103, 2001.

BAUER, E. **Avaliação da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. São Paulo, 1995. 236p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

BENTZ, D. P. Influence of silica fume on diffusivity in cement – based materials: II. Multiscale modeling of concrete diffusivity. **Cement and Concrete Research**, v.30, p. 1121 – 1129, 2000.

BIER, T. Influence of type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hardened cement pastes. **MRS Symposium Proceedings**, vol.85, pp. 123-134, 1997.

BODDY, A.; HOOTON, R. D.; GRUBER, K. A. Long –term testing of the chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin. **Cement and Concrete Research**, v.31, p. 759-765, 2001.

BRAUN, V. **Influência das condições de moldagem e cura nas características do cobrimento de diversos concretos**. Goiânia, 2003. 200p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

CALÇADA, L. M. L.. **Estudo da eficácia do ensaio de migração em condições de fluxo não estacionário na previsão da penetração de cloretos em concreto**. Florianópolis, 2004. 214p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. Goiânia, Editora UFG/ São Paulo, 1997.

CASCUDO, O. Inspeção e diagnóstico de estrutura de concreto com problemas de corrosão da armadura. *In: ISAIA, G.C. (Ed.) Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo : Ibracon, cap.35, vol 2, 2005, p. 1071 – 1105.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests. **Cement and Concrete Research**, v.31, p. 1411 – 1420, 2001.

CASTRO, A. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação**. Goiânia, 2003. 215p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

CATHER, R. et al. Improvements to the Figg method for determining the air permeability of concrete. **Magazine of Concrete Research**, (S.1.), v.36, n. 129, p. 241- 245, 1984.

CEB. **Durability of concrete structures** . State of the Art Report. Bulletin D'Information n. 148, Paris, 1982.

COLLEPARDI, M.; MARCIALIS, A.; TURRIZIANNI, R. La cinética di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo. **Il Cemento**, v.67, n.4, p. 157 – 164, 1970.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON – CEB. **Durabilidad de estructuras de hormigon: guia de diseño CEB**. Madrid, 1993. (GE-HO-CEB-Boletin12).

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais para Concreto Estrutural. *In: ISAIA, G.C. (Ed.) Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo : Ibracon, cap.12, vol 1, 2005, p. 345 – 379.

FEITOSA, C. A. G. **Avaliação da sensibilidade do ensaio de penetração de água sob pressão e de um índice de permeabilidade para o concreto**. Goiânia, 2000. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo Escola Politécnica.

FERREIRA, R. B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de Armaduras Induzidas por Cloretos**. Goiânia, 2003. 244 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

FERREIRA, R., M. **Avaliação de ensaios de durabilidade do betão**. Guimarães, 2000. 200p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Universidade do Minho.

FIGG, J. W. Methods of measuring the air and water permeability of concrete. **Magazine of Concrete Research**, (S.1.), v. 15, n.85, p. 213-219, 1973.

FRIEDMANN, H.; AMIRI, O.; MOKHTAR, A.; DUMARGUE, P. A direct method for determining chloride diffusion coefficient by using migration test. **Cement and Concrete Research**, v.34, p. 1967 – 1973, 2004.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. **Procedimento IT.DCT.TC.403**: Análise química por absorção atômica. Manual da Qualidade. Departamento de Apoio e Controle Técnico. Goiânia, 2008.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. **Procedimento IT.DCT.TC.408**: Cimento e materiais em pó – Análise química por meio do espectrômetro de fluorescência de raios-X. Manual da Qualidade. Departamento de Apoio e Controle Técnico. Goiânia, 2008.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. **Procedimento IT.DCT.TC.409**: Óxido de sódio e potássio – Determinação para fotometria de chama. Manual da Qualidade. Departamento de Apoio e Controle Técnico. Goiânia, 2008.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. **Procedimento IT.DCT.TC.413**: Determinação dos álcalis do cimento solúveis em água. Manual da Qualidade. Departamento de Apoio e Controle Técnico. Goiânia, 2008.

FURQUIM, P. R. V. **Estudo estatístico de produção de concretos com adições minerais**. Santa Maria, 2006. 167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria.

GASTALDINI, A. L. G. Influência das adições minerais na porosidade de pastas de cimento Portland. In: **4º Congresso Brasileiro do Cimento**, 1996, São Paulo, Anais. São Paulo, 1996. p. 119 – 136.

GEIKER, M.; GRUBE, H. *et al.* **Laboratory Test Methods**. Performance Criteria for Concrete Durability, cap. 9, RILEM Report 12, 1995, p. 235-252.

GEYER, A. L. B.; GREVEN, H. A. Concreto com fôrmas drenantes. In: **SEMINÁRIO INTERNACIONAL: AVANÇOS NA TECNOLOGIA DO CONCRETO**. Goiânia, 1999. p. 17-31. Anais. Goiânia, 1999.

GJØRV, O. E. **Concrete performance criteria based on migration experiments.** In: International Conference on High Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures, Proceedings, Florianópolis, 1996, p. 425 – 432.

GJØRV, O. E. **Service life of concrete structures and performance-based quality control.** In: International Workshop on Innovations in Concrete Materials, Whistler, Canada, 2001, pp. 13.

GRUBER, K. A.; RAMILOCHAN, T.; BODDY, A. HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin. *Cement Concrete Composites.* v.23, p. 479 – 484, 2001.

HALAMICKOVA, P.; DETWILER, R. J. Water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter. **Cement and Concrete Research**, v.25, n. 4, p. 780 – 802, 1995.

HELENE, P. R. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** Tese de livre docência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 1993.

HOFFMANN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos.** Porto Alegre, 2001. 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

HOLLY, J; *et al.* Modelling relationships between permeability and cement paste pore microstructures, **Cement Concrete Research.** v. 23, p. 1317-1330, 1993.

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

JUCÁ, T. R. P. **Avaliação de cloretos livres em concretos e argamassas de cimento portland pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata.** Goiânia, 2002. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

KHATRI, R. P.; SIRIVIVATNANON, V. Methods for the determination of water permeability of concrete, **ACI materials journal.** v. 94, nº3, p. 257-261.

KIHARA, Y., CENTURIONE, S. L. O cimento Portland. *In: ISAIA, G.C. (Ed.) Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo : Ibracon, cap.10, vol 1, 2005, p. 295 - 322.

KROPP, J. **Performance criteria for concrete durability**. E & FN spon, London, 1995. p.139 – 161.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. Betões - Determinação da permeabilidade ao ar e à água - Método de Figg. **E 413, 1993**. Portugal.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. Betões - Determinação da permeabilidade ao oxigênio - Método de Figg. **E 392, 1993**. Portugal.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. Betões - Determinação da resistência à penetração de cloretos. Ensaio de imersão. **E 390, 1993**. Portugal.

LARA, P., L., O. **Análise da relação entre propriedades de transporte de água e os mecanismos de corrosão das armaduras**. Brasília, 2003. 154p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2003.

LEÃO, S.; GONÇALVES, H. S.; FERREIRA, R. C.; FIGUEIREDO, E. P. Permeabilidade do concreto ao ar pelo método de Figg. *In: 41º Congresso Brasileiro do Concreto*. Anais. Salvador, 1999, 10p.

LIANG, M. T *et al.*. Service Life Prediction of Reinforced Concrete Structures. **Cement Concrete Research**. v. 29, p. 1411-1418, 1999.

MECK, E.; SIRIVIVATNANON. Field indicator of chloride penetration depth. **Cement and Concrete Research**, v.33, p.1113-1117, 2003.

MEDEIROS, M. H. F., HELENE, P. Estudo da carbonatação em concretos e argamassas. **Revista Engenharia, Ciência e Tecnologia**, v.o4, n.5, p.3-12, 2001.

MEHTA, P. K. AİTCIN, P. C. Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high strength concrete. *In: HESTER, W. (ed) International Conference on Utilization of High Strenght Concrete*, 2<sup>nd</sup>, 1990, Berkeley. Proceedings...Detroit: American Concrete Institute, 1990a. p. 265-287 (SP-121).

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

NARSILIO, G. A.; LI, R.; PIVONKA, P.; SMITH, D. W. Comparative study of methods used to estimative ionic diffusion coefficients using migration tests. **Cement and Concrete Research**, v.37, p. 1152 – 1163.

NEPOMUCENO, A.A. Mecanismo de Transporte de Fluidos no Concreto. *In: ISAIA, G.C. (Ed.) Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo : Ibracon, cap.26, vol 2, 2005, p. 793 – 827.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. **Concrete technology**: updated. 2. rev.Singapura, 1997.

NGALA, V. T., Effect of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes, **Cement Concrete Research**. v. 27, p. 995 -1007, 1997.

NT BUILD 492, “Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient From Non-Steady Migration Experiments, Approved 1999-11.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; EL TARRAS, A. *Diffusion of Chloride ions in hardened cement pastes*. **Cement Concrete Research**. v.11, p. 397 - 406, 1981.

PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura**. Porto Alegre, 2001. 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PRUDÊNCIO JR., L. R.; FELDMAN, R. F.; CHAN, G. W. Rapid chloride permeability test on blended cement and other concretes: correlations between charge, initial current and conductivity. **Construction and Building Materials**, v.13, p.149-154, 1999.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D’ESSAIS ET MATERIAUX. **Performance criteria for concrete durability. State of the Art Report of Rilem Technical Committee Tc-116-PCD**. Ed. By J. Kropp e H. K. Hilsdorf, Rilem Report 12, E e Fn Spon, Chapman e Hall, London, 1995.

ROSSIGNOLO, J. A. Avaliação da microestrutura da zona de transição pasta-agregado de concretos com sílica ativa e látex sbr. *In: 47° Congresso Brasileiro do Concreto*. Anais...Recife, 2005. 10p.

RUSSEL, D.; *et al*. Effect of relative humidity and air permeability on prediction of the rate of carbonation of concrete, **Structures and Buildings** 146 (3) (2001) 319-326.

SALTA, M., M. **Prevenção da corrosão no betão armado**. 1999, 277p. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

SALTA, M. M. **Measurement of concrete resistance to chloride penetration using several test methods**. In: International RILEM Workshop on Testing and Modeling Chloride Ingress in Concrete. Electronic Proceeding. Paris, 2000, 11p.

SALTA, M. M; GONÇALVES, A. **Métodos de caracterização da resistência dos betões em ambientes agressivos**. Prevenção da corrosão em estruturas de betão armado, Seminário, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, p. 181-226, 1996.

SAMSON, E.; MARCHAND, J.; SNYDER, K. A. Calculation of ionic diffusion coefficients on the basis of migration test results. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, v.36, p.156-165, 2003.

SANCHEZ, E. Aspectos gerais e reológicos do concreto de alta resistência. In: **39 Congresso Brasileiro Do Concreto**, 1997, São Paulo. Anais. 2 v, v.2, p. 643-660. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo, 1997.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos**. Brasília, 2006. 161p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2006.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. 1998, 163p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVA, P. F. A. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana**. 1 ed. São Paulo, Pini, 1995.

SONG, H. W., KWON, J. K. **Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure**, Cement Concrete Research. v.37, p. 909-915, 2007.

STREICHER, P. E.; ALEXANDER, M. G. A chloride conduction test for concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, p.1284 – 1294, 1995.

TANG. Electrically accelerated methods for determining chloride diffusivity in concrete – current development. **Magazine of Concrete Research**, (S.1.), v.48, n. 176, p. 173-179, 1996.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2<sup>nd</sup> edition. London: Thomas Telford, 1997. 459 p.

TONG, L.; GJØRV, O. E. Chloride diffusivity based on migration testing. **Cement and Concrete Research**, v.31, p. 973 – 982, 2001.

WHITING, D. Rapid Measurement of the chloride permeability of concrete. *Public Roads*, v.45, n°3, p.101 – 112, 1981.

YANG, C. C. A comparison of transport properties for concrete using the ponding test and the accelerated chloride migration test. *Materials and Structures*, v.38, p. 313 – 320, 2005.

ZHANG, T.; GJØRV, O. E. Effect of ionic interaction in migration testing of chloride diffusivity in concrete. **Cement and Concrete Research**, v.25, n.7, p. 1535 – 1542, 1995.

## ANEXO A

### AUXILIARES

Tabela A.1 - Diferença de potencial a ser aplicada e duração do ensaio, em função da corrente elétrica inicial do corpos-de-prova de concreto.

Corrente inicial $I_{0V}$ (com 30V) (mA)	Voltagem aplicada $U$ (após ajuste) (V)	Nova corrente inicial possível $I_p$ (mA)	Duração da análise $t$ (hora)
$I_p < 5$	60	$I_p < 10$	96
$5 \leq I_p < 10$	60	$10 \leq I_p < 20$	48
$10 \leq I_p < 15$	60	$20 \leq I_p < 30$	24
$15 \leq I_p < 20$	50	$25 \leq I_p < 35$	24
$20 \leq I_p < 30$	40	$25 \leq I_p < 40$	24
$30 \leq I_p < 40$	35	$35 \leq I_p < 50$	24
$40 \leq I_p < 60$	30	$40 \leq I_p < 60$	24
$60 \leq I_p < 90$	25	$50 \leq I_p < 75$	24
$90 \leq I_p < 120$	20	$60 \leq I_p < 80$	24
$120 \leq I_p < 180$	15	$60 \leq I_p < 90$	24
$180 \leq I_p < 360$	10	$60 \leq I_p < 120$	24
$I_p \geq 360$	10	$I_p \geq 120$	6

Tabela A.2 – Distribuição de Fisher – valores de tabelado (Ftab) para  $\alpha = 0,05$ .

v2*	Graus de liberdade do numerador (divisor) v1																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30	40	60	120	$\infty$	
1	161,45	199,50	215,71	224,58	230,16	233,99	236,77	238,88	240,54	241,88	243,00	243,95	244,62	245,08	245,38	245,57	245,70	245,78	245,83	245,86
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,43	19,45	19,46	19,46	19,47	19,48	19,49	19,49	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,70	8,66	8,63	8,62	8,59	8,57	8,55	8,55	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,64	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,52	4,50	4,46	4,43	4,40	4,37	4,37
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,83	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,40	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,59	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,11	3,09	3,04	3,01	2,97	2,93	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,89	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,73	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,60	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,62	2,54	2,50	2,47	2,43	2,39	2,34	2,30	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,41	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39	2,34	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,28	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,23	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,18	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,14	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,07	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,15	2,07	2,02	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,13	2,05	2,00	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,97	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,07	1,99	1,94	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,06	1,97	1,92	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,23	2,18	2,10	2,03	1,94	1,89	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,01	1,93	1,88	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,13	2,08	2,00	1,92	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,84	1,75	1,69	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,18	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66	1,60	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25	1,25
$\infty$	3,84	3,00	2,61	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57	1,51	1,46	1,39	1,32	1,23	1,13	1,13

\* Graus de liberdade do residual (erro)

## ANEXO B

### ANÁLISE PETROGRÁFICA

As análises petrográficas realizadas em lâmina delgada tiveram como objetivo a classificação mineralógica da amostra de agregado graúdo de dimensão máxima igual a 12,5 mm. As análises foram realizadas utilizando o microscópio ótico de luz transmitida, marca LEICA, modelo ORTOLUX II POL-BK.

A análise em lâmina delgada mostra que a rocha é de natureza ígnea, classificada microscopicamente como GRANODIORITO. Pelo exame macroscópico a rocha apresenta coloração cinza claro (quase branco) e estrutura maciça. Microscopicamente apresenta composição mineralógica principal estimada de: 75% a 80% de feldspato; 20% a 25% de quartzo; 1% a 2% de biotita, muscovita e epidoto, e traços de titanita, apatita e carbonato.

As Micrografias apresentadas pela Figura 3.5 registram as feições petrográficas da lâmina da amostra de rocha (brita 12,5 mm).

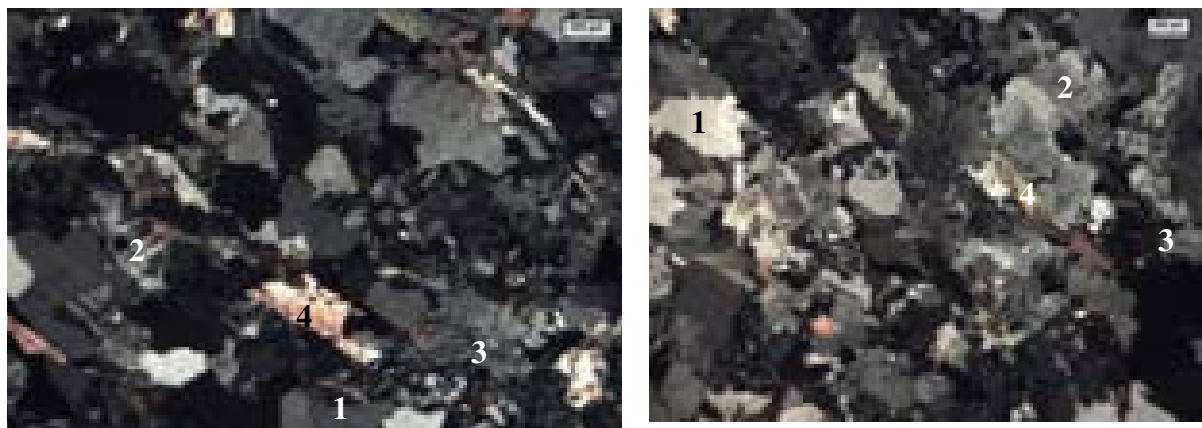


Figura B.1 – a) Aspecto geral da rocha, mostrando a textura granular alotriomórfica. Quartzo (1), microclínio (2), plagioclásio (3) e muscovita (4). Nicóis cruzados

A lâmina analisada é brita composta de fragmentos com tamanho médio em torno de 2 cm de granodiorito. Este consiste em uma rocha de granulação média e textura granular alotriomórfica. O feldspato (microclina e plagioclásio) ocorre em cristais irregulares apresentando suas geminações características. Já o microclínio parece ligeiramente mais abundante do que o plagioclásio (representado por uma variedade sódica); em alguns contatos entre as duas variedades são encontrados intercrescimentos mirmequíticos de ocorrência restrita. O plagioclásio apresenta incipiente alteração para epidoto e muscovita, além de raro carbonato. O quartzo ocorre em agregados de cristais irregulares a maioria apresentando extinção ondulante de ângulo variando de 10° a 17°. Biotita e muscovita ocorrem esparsamente disseminadas pela rocha e apresentam orientação quase paralela, estabelecendo certa orientação da rocha; porém esta orientação não está bem evidenciada na amostra de mão. Quanto à titanita e apatita, sua ocorrência é muito restrita.

Finalizando, a rocha é de natureza ígnea ácida a intermediária, com incipiente orientação de seus constituintes micáceos, representados pela biotita e muscovita.

## ANEXO C

### RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS

Tabela C.1 – Resultados individuais de resistência à compressão.

Concreto	Teor de adição	a/ag	Resistência à compressão média (MPa)					
			cp	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias	126 dias
Referência	0	0,35	cp1	46,78	48,87	52,49	53,57	53,92
			cp2	47,62	51,43	53,43	56,07	56,32
		0,45	cp1	34,48	43,10	48,34	45,92	48,95
			cp2	35,09	43,77	48,20	45,09	49,23
		0,55	cp1	22,46	28,25	27,12	33,43	34,25
			cp2	22,68	30,31	32,17	34,26	32,98
		0,55*	cp1	20,26	23,77	27,20	29,40	29,76
			cp2	21,09	26,28	26,50	24,54	30,70
Sílica	10	0,35	cp1	37,36	52,63	52,42	65,89	69,30
			cp2	35,14	47,54	62,09	63,07	65,09
		0,45	cp1	38,47	45,11	57,02	57,04	54,80
			cp2	40,55	49,23	58,63	56,67	56,87
		0,55	cp1	22,01	37,05	42,00	43,14	43,94
			cp2	23,51	39,61	43,10	45,54	46,18
		0,55*	cp1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
			cp2	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Escória de Alto-forno	50	0,35	cp1	36,15	50,93	51,36	58,36	56,13
			cp2	33,68	36,93	53,54	57,44	57,23
		0,45	cp1	26,10	33,49	40,60	49,69	48,42
			cp2	26,48	34,43	42,82	45,07	48,85
		0,55	cp1	19,28	34,93	40,65	40,06	39,01
			cp2	20,08	32,14	45,00	39,29	41,25
		0,55*	cp1	19,71	29,53	35,71	39,93	41,91
			cp2	19,35	26,97	36,82	42,33	34,20

\* não carbonatado  
N.D. = não determinado.

Tabela C.2 – Resultados individuais de porosidade, altura capilar e raio médio.

Concreto	Teor de adição(%)	a/ag		Porosidade do concreto	Altura capilar	Raio médio
			cp	(%)	(mm)	(mm)
Referência	0	0,35	cp1	12,60	78,62	2,48E-06
			cp2	12,49	70,23	1,98E-06
			cp3	12,45	76,59	2,36E-06
		0,45	cp1	12,95	65,75	1,74E-06
			cp2	12,96	69,35	1,93E-06
			cp3	13,12	67,42	1,83E-06
		0,55	cp1	13,94	79,78	2,56E-06
			cp2	14,33	78,31	2,46E-06
			cp3	14,35	85,31	2,92E-06
		0,55*	cp1	14,17	76,61	2,36E-06
			cp2	14,46	70,32	1,99E-06
			cp3	13,96	74,82	2,24E-06
Sílica	10	0,35	cp1	13,20	37,76	5,73E-07
			cp2	13,58	42,79	7,36E-07
			cp3	13,22	39,71	6,34E-07
		0,45	cp1	13,85	42,01	7,09E-07
			cp2	14,03	45,55	8,34E-07
			cp3	13,67	40,52	6,60E-07
		0,55	cp1	15,70	51,58	1,07E-06
			cp2	15,62	50,18	1,01E-06
			cp3	15,44	55,00	1,22E-06
		0,55*	cp1	15,76	61,80	1,53E-06
			cp2	15,52	61,79	1,53E-06
			cp3	15,59	61,80	1,53E-06
Escória de Alto-forno	50	0,35	cp1	13,42	46,80	8,80E-07
			cp2	13,51	42,17	7,15E-07
			cp3	13,84	38,27	5,87E-07
		0,45	cp1	14,67	48,20	9,34E-07
			cp2	14,51	45,28	8,24E-07
			cp3	14,43	48,23	9,35E-07
		0,55	cp1	14,62	41,94	7,07E-07
			cp2	15,15	43,05	7,45E-07
			cp3	14,49	50,06	1,01E-06
		0,55*	cp1	15,05	47,91	9,22E-07
			cp2	15,32	44,47	7,95E-07
			cp3	15,24	63,73	1,63E-06

\* não carbonatado

Tabela C.3 – Resultados individuais de absorção por capilaridade.

Concreto	Teor de adição(%)	Código	Absorção por capilaridade (g/cm <sup>2</sup> ) (ABNT NBR 9779 : 1995)		
Referência	0	RC35-01	0,91		
		RC35-02	1,03		
		RC35-03	0,97		
		RI35-01	1,34		
		RI35-02	1,25		
		RC45-01	1,22		
		RC45-02	1,34		
		RC45-03	1,25		
		RI45-01	1,59		
		RI45-02	1,50		
		RC55-01	RC55N-01	1,38	1,28
		RC55-02	RC55N-02	1,44	1,10
		RC55-03	RC55N-03	1,60	1,22
		RI55-01	RI55N-01	1,62	1,54
RI55-02	RI55N-02	1,51	1,57		
Sílica	10	SC35	0,59		
		SC35	0,59		
		SC35	0,51		
		SI35	0,59		
		SI35	0,67		
		SC45	0,70		
		SC45	0,75		
		SC45	0,76		
		SI45	0,97		
		SI45	0,94		
		SC55-01	SC55N-01	0,84	0,72
		SC55-02	SC55N-02	0,74	0,77
		SC55-03	SC55N-03	0,98	0,64
		SI55-01	SI55N-01	0,96	0,84
SI55-02	SI55N-02	1,18	0,86		
Escória de Alto-forno	50	EC35	0,50		
		EC35	0,47		
		EC35	0,42		
		EI35	0,53		
		EI35	0,61		
		EC45	0,64		
		EC45	0,66		
		EC45	0,55		
		EI45	0,85		
		EI45	0,95		
		EC55-01	EC55N-01	0,66	0,88
		EC55-02	EC55N-02	0,73	0,74
		EC55-03	EC55N-03	0,70	0,63
		EI55-01	EI55N-01	1,01	1,12
EI55-02	EI55N-02	0,97	1,11		

Tabela C.4 – Resultados individuais de permeabilidade ao ar.

Concreto	Teor de adição(%)	Código	Permeabilidade ao ar (segundos)		
			(Método de Figg)		
Referência	0	RC35-01	850		
		RC35-02	725		
		RC35-03	525		
		RC35-04	580		
		RC45-01	564		
		RC45-02	606		
		RC45-03	400		
		RC45-04	855		
		RC55-01	RC55N-01	227	120
		RC55-02	RC55N-02	174	156
		RC55-03	RC55N-03	156	173
		RC55-04	RC55N-04	154	132
Sílica	10	SC35-01	795		
		SC35-02	713		
		SC35-03	855		
		SC35-04	937		
		SC45-01	789		
		SC45-02	690		
		SC45-03	706		
		SC45-04	805		
		SC55-01	SC55N-01	459	229
		SC55-02	SC55N-02	336	165
		SC55-03	SC55N-03	304	290
		SC55-04	SC55N-04	395	204
Escória de Alto-forno	50	EC35-01	514		
		EC35-02	209		
		EC35-03	347		
		EC35-04	651		
		EC45-01	78		
		EC45-02	52		
		EC45-03	48		
		EC45-04	86		
		EC55-01	EC55N-01	60	30
		EC55-02	EC55N-02	66	26
		EC55-03	EC55N-03	46	26
		EC55-04	EC55N-04	57	30

Tabela C.5 – Resultados individuais de penetração de água sob pressão

Concreto	Teor de adição(%)	Código	Penetração de água sob pressão (mm) (ABNT NBR 10787 : 1994)		
Referência	0	RC35-01	13,00		
		RC35-02	8,00		
		RC35-03	12,00		
		RI35-01	14,50		
		RI35-02	17,00		
		RI35-03	18,00		
		RC45-01	27,78		
		RC45-02	22,75		
		RC45-03	32,81		
		RI45-01	49,53		
		RI45-02	47,15		
		RI45-03	33,02		
		RC55-01	RC55N-01	28,29	29,36
		RC55-02	RC55N-02	32,05	32,35
		RC55-03	RC55N-03	27,20	29,80
		RI55-01	RI55N-01	55,65	53,75
RI55-02	RI55N-02	51,00	52,17		
RI55-03	RI55N-03	52,30	54,04		
Sílica	10	SC35-01	5,74		
		SC35-02	4,65		
		SC35-03	5,16		
		SI35-01	13,41		
		SI35-02	8,34		
		SI35-03	10,88		
		SC45-01	10,80		
		SC45-02	10,74		
		SC45-03	11,10		
		SI45-01	9,35		
		SI45-02	5,45		
		SI45-03	7,40		
		SC55-01	SC55N-01	18,9	12,36
		SC55-02	SC55N-02	16,24	15,02
		SC55-03	SC55N-03	24,41	38,81
		SI55-01	SI55N-01	30,96	20,25
SI55-02	SI55N-02	27,97	8,71		
SI55-02	SI55N-02	28,04	34,25		
Escória de Alto-forno	50	EC35-01	28,37		
		EC35-02	20,81		
		EC35-03	N.D.		
		EI35-01	38,23		
		EI35-02	25,52		
		EI35-03	N.D.		
		EC45-01	44,26		
		EC45-02	43,51		
		EC45-03	45,19		
		EI45-01	38,84		
		EI45-02	34,07		
		EI45-03	36,77		
		EC55-01	EC55N-01	63,00	36,45
		EC55-02	EC55N-02	78,55	82,76
		EC55-03	EC55N-03	N.D.	59,76
		EI55-01	EI55N-01	46,06	55,25
EI55-02	EI55N-02	65,46	68,20		
EI55-02	EI55N-02	N.D.	61,73		

Tabela C.6 – Resultados individuais de penetrabilidade de cloretos.

Concreto	Teor de adição(%)	Código	Carga passante (C)		
Referência	0	RC35-01	3320		
		RC35-02	3503		
		RC35-03	2915		
		RI35-01	3905		
		RI35-02	4723		
		RI35-03	4023		
		RC45-01	6576		
		RC45-02	5605		
		RC45-03	5590		
		RI45-01	6702		
		RI45-02	9347		
		RI45-03	8141		
		RC55-01	RC55N-01	8907	8148
		RC55-02	RC55N-02	10325	9426
		RC55-03	RC55N-03	8518	9386
		RI55-01	RI55N-01	10575	10415
RI55-02	RI55N-02	13381	11813		
RI55-03	RI55N-03	12023	14799		
Sílica	10	SC35-01	144		
		SC35-02	139		
		SC35-03	133		
		SI35-01	165		
		SI35-02	171		
		SI35-03	170		
		SC45-01	253		
		SC45-02	272		
		SC45-03	267		
		SI45-01	343		
		SI45-02	366		
		SI45-03	352		
		SC55-01	SC55N-01	601	673
		SC55-02	SC55N-02	647	636
		SC55-03	SC55N-03	776	699
		SI55-01	SI55N-01	789	791
SI55-02	SI55N-02	959	792		
SI55-03	SI55N-03	676	813		
Escória de Alto-forno	50	EC35	439		
		EC35	433		
		EC35	461		
		EI35	468		
		EI35	468		
		EI35	474		
		EC45	923		
		EC45	921		
		EC45	817		
		EI45	684		
		EI45	680		
		EI45	700		
		EC55-01	EC55N-01	1296	1207
		EC55-02	EC55N-02	1230	1093
		EC55-03	EC55N-03	1359	1150
		EI55-01	EI55N-01	1101	1189
EI55-02	EI55N-02	1098	1182		
EI55-03	EI55N-03	1001	1282		

Tabela C.7 – Resultados individuais dos coeficientes de difusão (ensaio de migração).

Concreto	Teor de adição(%)	Código	Ensaio migração (não estacionário) – 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s		
Referência	0	RC35-01	11,07		
		RC35-02	11,59		
		RC35-03	9,93		
		RI35-01	11,15		
		RI35-02	11,37		
		RI35-03	10,76		
		RC45-01	22,17		
		RC45-02	22,77		
		RC45-03	23,42		
		RI45-01	22,41		
		RI45-02	27,35		
		RI45-03	32,05		
		RC55-01	RC55N-01	44,69	50,57
		RC55-02	RC55N-02	45,26	50,57
		RC55-03	RC55N-03	44,97	48,27
		RI55-01	RI55N-01	46,84	48,54
RI55-02	RI55N-02	45,81	50,57		
RI55-03	RI55N-03	45,80	50,57		
Sílica	10	SC35-01	0,80		
		SC35-02	0,85		
		SC35-03	1,16		
		SI35-01	0,94		
		SI35-02	1,00		
		SI35-03	0,76		
		SC45-01	1,20		
		SC45-02	1,59		
		SC45-03	1,62		
		SI45-01	1,43		
		SI45-02	1,37		
		SI45-03	1,25		
		SC55-01	SC55N-01	4,04	4,14
		SC55-02	SC55N-02	5,23	4,39
		SC55-03	SC55N-03	5,14	4,44
		SI55-01	SI55N-01	5,02	3,69
SI55-02	SI55N-02	3,75	4,94		
SI55-03	SI55N-03	5,10	4,18		
Escória de Alto-forno	50	EC35	1,88		
		EC35	2,81		
		EC35	2,85		
		EI35	2,87		
		EI35	2,46		
		EI35	2,60		
		EC45	4,96		
		EC45	6,38		
		EC45	4,87		
		EI45	4,23		
		EI45	4,81		
		EI45	4,83		
		EC55-01	EC55N-01	9,96	3,84
		EC55-02	EC55N-02	8,96	4,70
		EC55-03	EC55N-03	8,71	4,50
		EI55-01	EI55N-01	5,79	6,00
EI55-02	EI55N-02	5,10	4,36		
EI55-03	EI55N-03	7,30	3,67		