

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Stephan Korndörfer Copetti

**CONCRETO COM AR INCORPORADO:
AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE FRENTE A AGENTES
AGRESSIVOS E ABSORÇÃO DE ÁGUA**

Porto Alegre
dezembro 2013

STEPHAN KORNDÖRFER COPETTI

**CONCRETO COM AR INCORPORADO:
AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE FRENTE A AGENTES
AGRESSIVOS E ABSORÇÃO DE ÁGUA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Ana Paula Kirchheim
Coorientadora: Simone Dornelles Venquiaruto

Porto Alegre
dezembro 2013

STEPHAN KORNDÖRFER COPETTI

**CONCRETO COM AR INCORPORADO:
AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE FRENTE A AGENTES
AGRESSIVOS E ABSORÇÃO DE ÁGUA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelas Professoras Orientadoras e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2013

Profa. Ana Paula Kirchheim
Dra. em Engenharia pela UFRGS
Orientadora

Simone Dornelles Venquiaruto
Mestre em Engenharia Civil pela UFSM
Coorientadora

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Eduardo Polesello
MEng pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Prof. Maurício Mancio (UNISINOS)
PhD pela Universidade da Califórnia,
Berkeley

Simone Dornelles Venquiaruto
MEng pela Universidade Federal de Santa
Maria

Prof. Ana Paula Kirchheim (UFRGS)
Dra. Pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Kátia e Marcus, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Ana Paula Kirchheim e à Simone Venquiaruto pela orientação, pela dedicação e pelo apoio oferecidos.

Agradeço aos laboratoristas do Norie, Airton, Gilmar e Nei, pelo auxílio durante a execução dos ensaios.

Agradeço a Priscila da Rosa pelo apoio durante a execução deste trabalho

Agradeço à professora Carin Maria Schmitt pela atenção e disponibilidade para solucionar qualquer dúvida.

E por fim, agradeço a minha família e amigos por todo apoio e paciência durante esta pesquisa e todo curso de graduação.

O estudo em geral, a busca da verdade e da beleza
são domínios em que nos é consentido
ficar crianças toda a vida

Albert Einstein

RESUMO

A durabilidade das estruturas de concreto tem sido uma preocupação constante de projetistas e construtores ao longo dos anos. Atualmente, um dos maiores desafios da construção civil é buscar alternativas construtivas, tecnológicas ou de novos materiais, que sejam viáveis, que possam contribuir para um melhor desempenho das edificações frente à ação de agentes agressivos, independente do ambiente em que a estrutura esteja inserida. A aplicação de diferentes tecnologias, aliadas a bons métodos construtivos e ao cumprimento das normas vigentes, podem trazer grandes benefícios no que se refere à durabilidade das estruturas de concreto. Este trabalho busca analisar o desempenho de uma destas tecnologias: o concreto com ar incorporado. O aditivo incorporador de ar, estudado nesta pesquisa, é comumente utilizado em países com clima frio. O produto tem o seu uso relacionado principalmente à proteção da estrutura contra o processo de gelo e degelo. Segundo o fabricante, outros benefícios são relacionados ao seu uso, como aumento da porosidade sem o comprometimento da permeabilidade do concreto, o que viabilizaria a sua utilização também em países tropicais, como o Brasil. Tendo em vista os benefícios que este produto pode trazer para a durabilidade dos concretos, foi desenvolvido um programa experimental para testar o desempenho de concretos com ar incorporado na penetração de cloretos (Método NT 492, 1999) e na absorção de água (NBR 9779, 2012). Os concretos foram moldados com cimento CPV ARI, relação água/cimento de 0,48 e aditivo incorporador de ar no teor de 0,15% (em relação à massa de cimento). Para avaliar a influência do tempo de mistura no processo de incorporação de ar no concreto, foram utilizados tempos de misturas de 5, 20, 45 e 90 minutos. Os resultados de penetração de cloretos mostraram que a utilização do aditivo incorporador de ar não teve efeitos significativos no coeficiente de migração de cloretos. No entanto, quando testados frente à absorção de água, os concretos com adição do incorporador apresentaram maiores valores, sendo estes acentuados com o aumento do tempo de mistura.

Palavras-chave: Concreto com Ar Incorporado. Absorção por Capilaridade. Migração de Cloretos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das propriedades estudadas	12
Figura 2 – Diagrama das etapas do trabalho	16
Figura 3 – Distribuição dos poros na pasta de cimento hidratada em diferentes estágios de hidratação	20
Figura 4 – Distribuição dos poros na pasta de cimento hidratada em diferentes relações água/cimento	20
Figura 5 – Dimensão dos sólidos e vazios presentes na pasta de cimento hidratada	22
Figura 6 – Representação zona de transição do concreto	24
Figura 7 – Sistema de poros – Concreto com ar incorporado	25
Figura 8 – Efeito da incorporação de ar na resistência do concreto para diferentes consumos de cimento	27
Figura 9 – Gráfico da “Lei dos Cinco”	31
Figura 10 – Modelo do processo de corrosão da armadura	37
Figura 11 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo	43
Figura 12 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo	45
Figura 13 – Resultados de resistência à compressão axial e do teor de ar incorporado em função da variação do percentual de aditivo	46
Figura 14 – Ensaio de absorção por capilaridade	51
Figura 15 – Preparo dos corpos de prova para ensaio de migração de cloretos	53
Figura 16 – Ensaio de migração de cloretos	53
Figura 17 – Nível de penetração de cloretos	54
Figura 18 – Resultados de resistência à compressão axial e teor de ar incorporado	56
Figura 19 – Valores médios de absorção por capilaridade.....	57
Figura 20 – Valores médios da altura máxima de ascensão de água	58
Figura 21 – Altura de ascensão capilar	59
Figura 22 – Efeito do tempo de mistura para absorção final	60
Figura 23 – Efeito da utilização do aditivo para absorção final	61
Figura 24 – Efeito da interação tempo de mistura x utilização do aditivo	61
Figura 25 – Coeficientes de migração de cloretos – Concretos de referência	63
Figura 26 – Coeficientes de migração de cloretos – Concretos com aditivo	63
Figura 27 – Coeficientes de migração de cloretos – Médias	64
Figura 28 – Efeito do tempo de mistura para migração de cloretos	65
Figura 29 – Efeito da utilização do aditivo para migração de cloretos	66
Figura 30 – Efeito da interação tempo de mistura x utilização do aditivo	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teores de ar incorporado recomendados pelo ACI	26
Tabela 2 – Caracterização físico/química do cimento	42
Tabela 3 – Caracterização física do agregado miúdo	43
Tabela 4 – Caracterização física do agregado graúdo	44
Tabela 5 – Resultados de resistência à compressão axial e do teor de ar incorporado em função da variação do percentual de aditivo	46
Tabela 6 – Relação água/cimento e traço unitário	48
Tabela 7 – Percentual de ar incorporado nos concretos e abatimento de tronco de cone em função do tempo de mistura	49
Tabela 8 – Resultados de resistência à compressão axial e teor de ar incorporado	56
Tabela 9 – Valores médios de absorção por capilaridade (g/cm ²)	57
Tabela 10 – Análise de variância para absorção por capilaridade em 72h	59
Tabela 11 – Análise de variância para absorção final – Concretos de referência	62
Tabela 12 – Análise de variância para absorção final – Concretos com aditivo	62
Tabela 13 – Análise de variância para migração de cloretos	65
Tabela 14 – Análise de variância para migração de cloretos – Concretos de referência .	67
Tabela 15 – Análise de variância para migração de cloretos – Concretos com aditivo ...	67

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	14
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA	14
2.2.1 Objetivo Principal	14
2.3 PRESSUPOSTO	14
2.4 PREMISA	15
2.5 DELIMITAÇÕES	15
2.6 LIMITAÇÕES	15
2.7 DELINEAMENTO	15
3 CONCRETO	18
3.1 MICROESTRUTURA	18
3.2 POROSIDADE	19
3.3 ZONA DE TRANSIÇÃO	22
3.4 CONCRETO COM AR INCORPORADO	24
4 DURABILIDADE	28
4.1 HISTÓRICO DA DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO	29
4.2 IMPORTÂNCIA DA DURABILIDADE	30
4.3 MODELO HOLÍSTICO DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO	31
4.4 PERMEABILIDADE	32
4.4.1 Mecanismos de transporte no concreto	34
4.4.2 Ensaio de absorção capilar	35
4.4.3 Penetração de íons cloretos	36
4.4.4 Ensaio de penetração de íons cloretos	37
4.5 DURABILIDADE DO CONCRETO COM AR INCORPORADO.....	39
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	41
5.1 MATERIAIS	41
5.2 ESTUDO PILOTO	45
5.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO	47
5.3.1 Mistura dos materiais	47
5.3.2 Moldagem dos corpos de prova	49
5.3.3 Cura	50
5.4 ENSAIOS REALIZADOS	50

5.4.1 Ensaio de absorção de água por capilaridade	50
5.4.2 Ensaio de migração de íons cloretos	52
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	55
6.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	57
6.3 MIGRAÇÃO DE CLORETOS	62
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
7.1 CONCLUSÕES	69
7.2 SUGESTÕES	70
REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

O concreto é, atualmente, o principal material utilizado na construção civil. Com uma produção anual estimada em cerca de 25 bilhões de toneladas ao ano, sendo a indústria do concreto a maior consumidora de recursos naturais do mundo (KLEE, 2009¹ apud CELIK et al., 2014). Isto resulta em um enorme impacto ambiental, com a mineração, processamento e transporte de agregados, um elevado consumo energético e grandes emissões de poluentes resultantes da produção de cimento, que são responsáveis por 7% das emissões globais de CO₂ (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 658-660).

Um dos requisitos para um futuro mais sustentável na construção civil é o aumento da durabilidade das estruturas. Segundo Mehta e Monteiro (2008, p. 122), estima-se que cerca de 40% dos recursos gastos na indústria da construção em países desenvolvidos seja aplicado no reparo e manutenção de estruturas já existentes. Medeiros et al. (2011, p. 788) ressaltam que, para garantir uma durabilidade adequada às estruturas de concreto armado, medidas adotadas durante a concepção do projeto e na dosagem do concreto resultam em uma maior economia, facilidade e segurança se comparadas à medidas de proteção posteriores ao período de construção. Assim, o investimento na durabilidade não é somente interessante no âmbito ambiental, ele também é atraente economicamente.

As principais manifestações patológicas de edificações de concreto armado são decorrentes do ingresso de fluidos agressivos na estrutura, como, por exemplo, dióxido de carbono, íons cloreto, oxigênio ou água. A facilidade com que os fluídos se deslocam no interior do concreto é função da sua permeabilidade (NEVILLE, 1997, p. 482). Um concreto durável deve, portanto, possuir baixa permeabilidade.

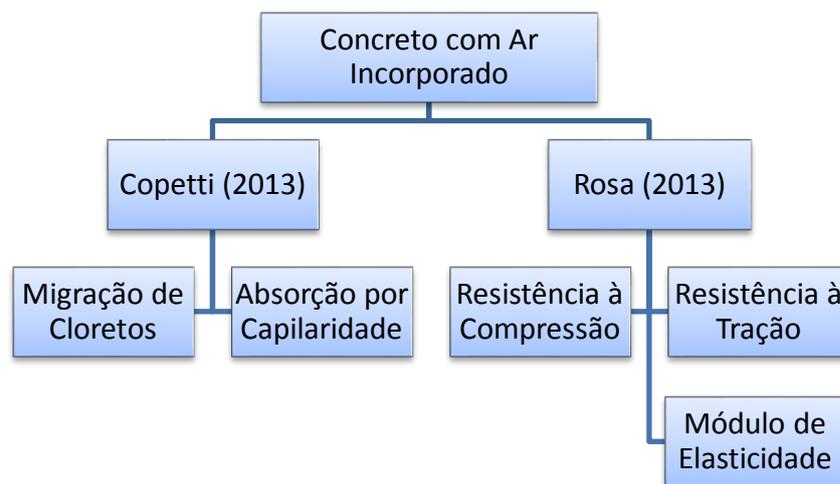
Uma das possíveis soluções para os desafios relacionados à otimização das dosagens de concreto é a utilização de aditivos. Já plenamente difundidos na indústria do concreto, os aditivos possuem diversas finalidades, entre elas aumentar a durabilidade do concreto em certas condições de exposição. Assim, este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de um destes aditivos, o aditivo incorporador de ar. Muito utilizado em países de clima frio

¹ KLEE, H. The cement sustainability initiative: recycling concrete. In: WORLD COUNCIL FOR SUSTAINABLE BUSINESS DEVELOPMENT, 2009, Geneva, p. 1-42.

como proteção contra as manifestações patológicas originadas pelo efeito de congelamento e degelo, o concreto com ar incorporado é pouco utilizado em regiões de clima mais ameno, como o Brasil, mesmo em locais que sofrem com baixas temperaturas, como a região Sul do país e construções com características especiais como o piso de câmaras frigoríficas. Devido à introdução de microporos descontínuos no concreto, acredita-se que a utilização de aditivos incorporadores de ar pode resultar na redução da permeabilidade sem grandes perdas na capacidade estrutural, apesar de aumentar sua porosidade, além de reduzir o peso específico do concreto.

Com o objetivo de preencher lacunas quanto ao uso e características destes aditivos, foi desenvolvido um projeto de pesquisa para análise do comportamento de concretos com este material. O programa experimental contemplou a execução de duas pesquisas, que foram realizadas em conjunto e simultaneamente. A pesquisa desenvolvida por Rosa (2013) estudou a influência do tempo de mistura em concretos com e sem aditivo incorporador de ar, nas propriedades mecânicas do concreto. Neste trabalho, o foco foi à durabilidade dos concretos. A figura 1 apresenta as propriedades estudadas em cada pesquisa. Os resultados de ambos os trabalhos foram apresentados como monografias de conclusão do curso de graduação em Engenharia Civil na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Figura 1 – Diagrama das propriedades estudadas



(fonte: elaborado pelo autor)

A estrutura do trabalho está organizada em sete capítulos. O primeiro capítulo deste trabalho apresenta esta introdução sobre o assunto estudado, seguida, no segundo capítulo, pelas diretrizes de pesquisa utilizadas na elaboração do trabalho. O terceiro capítulo aborda um

estudo sobre a microestrutura do concreto. O quarto capítulo trata da questão da durabilidade das estruturas de concreto armado. No quinto capítulo, é descrito o programa experimental, seguido da apresentação de discussão dos resultados no sexto capítulo. Por fim, no sétimo capítulo, são apresentadas as considerações finais e sugestões para futuros estudos. Ao final, apresenta-se a bibliografia utilizada.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As seguintes diretrizes foram adotadas na elaboração deste trabalho.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual é o desempenho do concreto com incorporador de ar em relação à penetração de cloretos e a absorção de água comparativamente a um concreto convencional e qual é a influência do tempo de mistura no seu desempenho?

2.2 OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo da pesquisa está descrito a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é, através de ensaios de laboratório, uma análise comparativa entre o concreto com incorporador de ar e o convencional, em diferentes tempos de mistura, frente à penetração de cloretos e a absorção de água.

2.3 PRESSUPOSTO

São pressupostos deste trabalho:

- a) foram considerados os ensaios de absorção por capilaridade e de migração de cloretos suficientes e adequados para análise da durabilidade do concreto com ar incorporado e convencional;
- b) foi considerado que 5 minutos é o tempo ideal de mistura do aditivo para obtenção das melhores características de durabilidade do concreto com incorporador de ar.

2.4 PREMISSA

A redução da durabilidade das estruturas e a necessidade do constante desenvolvimento de novas tecnologias e novos materiais que auxiliem na execução de obras mais duráveis e sustentáveis servem de premissa para este trabalho.

2.5 DELIMITAÇÕES

Este trabalho se delimita ao estudo do comportamento de concretos com ar incorporado frente aos ensaios de migração de íons cloreto e absorção de água.

2.6 LIMITAÇÕES

Devido ao tempo e recursos reduzidos, foi necessário impor as seguintes limitações ao trabalho:

- a) foi utilizado apenas um tipo de cimento, CP-V ARI;
- b) entre as várias propriedades relacionadas com a durabilidade das estruturas, foram escolhidas duas, a absorção capilar e a penetração de cloretos;
- c) os corpos de prova foram produzidos e moldados em laboratório, com dimensão de 10x20cm;
- d) foram utilizados para tempo de mistura do aditivo incorporador de ar, além dos 5 minutos, os tempos 20 minutos, 45 minutos e 90 minutos;
- e) foi utilizado o teor de aditivo incorporador de ar equivalente a 0,15% em relação à massa de cimento;
- f) os ensaios foram realizados com corpos de prova com idade de 28 dias.

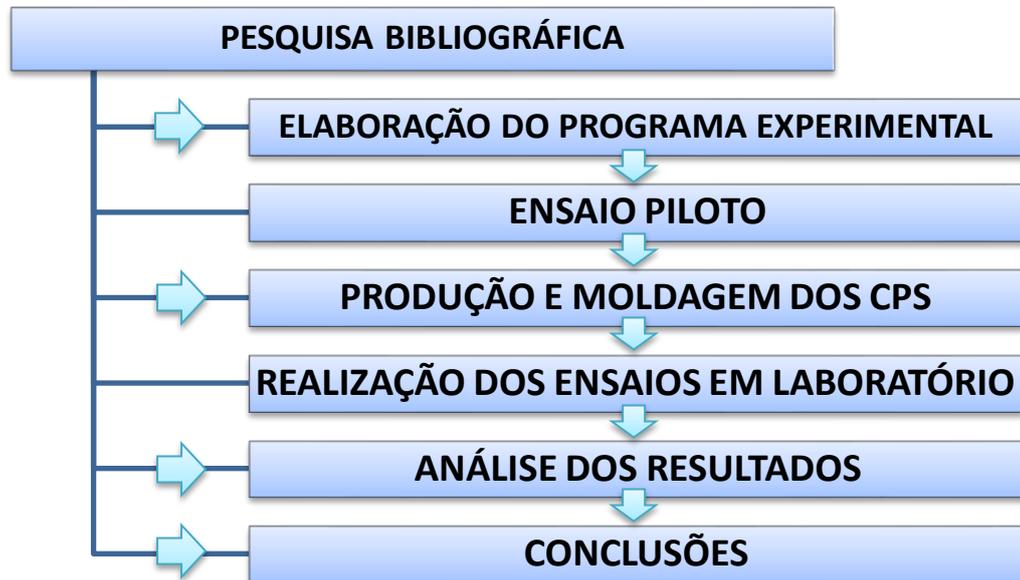
2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi desenvolvido através das seguintes etapas, representadas na figura 2:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do programa experimental;
- c) realização do ensaio piloto;
- d) produção e moldagem dos corpos de prova;
- e) realização dos ensaios em laboratório;
- f) análise dos resultados;

g) conclusões.

Figura 2 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

A primeira etapa consiste na realização da **pesquisa bibliográfica**, com objetivo de ampliar o conhecimento sobre o tema. Foram utilizados livros, artigos, teses, dissertações e normas técnicas para obtenção de informações sobre concreto, principalmente na área de microestrutura e durabilidade, possibilitando a execução de todo o restante do trabalho. Esta etapa teve maior ênfase durante os primeiros meses, mas permaneceu apoiando o desenvolvimento até a conclusão da pesquisa.

Posteriormente foi elaborado o **programa experimental**, no qual foram detalhados todos os ensaios de laboratório realizados. Foi determinado o material necessário, assim como os detalhes de execução de cada ensaio.

Com o programa experimental definido, a próxima etapa foi a obtenção do teor de aditivo incorporador de ar utilizado nas etapas posteriores do trabalho, através de um **ensaio piloto**. Em sequência, foram **produzidos e moldados os corpos de prova** utilizados nos ensaios de absorção por capilaridade e migração de cloretos. Simultaneamente foram moldados os corpos de prova utilizados para obtenção das características mecânicas do concreto, utilizados para o trabalho realizado por Rosa (2013). Em ambos os casos foram moldados corpos de

prova de concreto com ar incorporado e de concreto convencional, para comparação dos resultados.

A próxima etapa foi a **realização dos ensaios de laboratório**, na qual foram executados todos os ensaios necessários, descritos no capítulo 5. Os resultados obtidos com os corpos de prova de concreto com ar incorporado foram então **analisados** e comparados com os resultados obtidos com os de concreto convencional. Desta comparação foram obtidas **conclusões** sobre o desempenho das características de durabilidade do concreto com incorporador de ar.

3 CONCRETO

Mehta e Monteiro (2008, p. 10) definem concreto como: “[...] um material compósito que consiste, essencialmente, de um meio aglomerante no qual estão aglutinadas partículas ou fragmentos de agregados. No concreto de cimento hidráulico, o aglomerante é formado por uma mistura de cimento hidráulico e água.”.

Atualmente, o concreto é o material estrutural mais utilizado no mundo. Isso se deve em grande parte devido à disponibilidade da matéria-prima necessária para sua fabricação, além das características do material como alta versatilidade, durabilidade e desempenho, proporcionando uma vida útil adequada a um custo competitivo (ISAIA, 2011). Apesar disso, muitos concretos não atingem o mínimo desempenho e são necessários trabalhos que esclareçam lacunas do conhecimento e contribuam para uma utilização ainda mais eficiente deste material. Este capítulo apresenta noções básicas de microestrutura do concreto, os efeitos da porosidade no material e uma análise da zona de transição, fatores importantes para o estudo da sua durabilidade, além de um item dedicado às características do concreto com ar incorporado.

3.1 MICROESTRUTURA

A complexidade e heterogeneidade da microestrutura do concreto geram grandes dificuldades na criação de modelos e na previsão do comportamento do material. Assim, as relações entre a microestrutura do concreto e suas propriedades não são completamente conhecidas. Apesar disso, o seu entendimento é necessário para uma melhor análise das diversas características do concreto, como sua durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Em escala microscópica, o concreto apresenta três fases principais (MEHTA; MONTEIRO, 2008):

- a) agregado;
- b) matriz da pasta de cimento;
- c) zona de transição, localizada na interface entre as outras duas fases.

A fase agregado geralmente não têm influência direta sobre a resistência do concreto, mas pode indiretamente afetá-la devido à alterações na zona de transição dependentes do tamanho e formato dos agregados. A massa unitária, o módulo de elasticidade e a estabilidade dimensional do concreto são as características do concreto diretamente relacionadas com o agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A pasta de cimento hidratado é composta principalmente pelos diferentes produtos de hidratação do cimento, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e os sulfoaluminatos de cálcio. A fase composta por C-S-H, responsável por cerca de 50 a 60% do volume de sólidos da pasta de cimento hidratada, possui a maior influência nas características do concreto e, portanto, pode ser considerada como a de maior importância (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

3.2 POROSIDADE

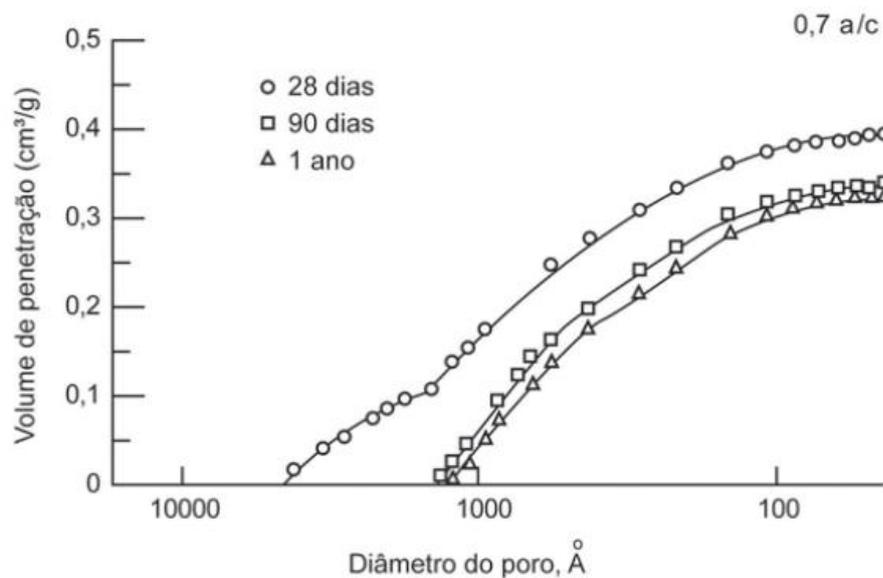
A quantidade de vazios presentes no concreto é de extrema importância, pois é diretamente relacionada com a sua resistência e permeabilidade. Neville (1997) afirma que a relação do volume de vazios em relação ao volume de material é o principal fator determinante da resistência da pasta de cimento, assim como em outros materiais frágeis. Mehta e Monteiro (2008) complementam que, enquanto existe uma relação exata entre a resistência e porosidade para pastas de cimento, a presença da zona de transição torna o concreto um material complexo demais para tal simplificação.

A formação da porosidade no interior do concreto se deve ao processo de hidratação. Com a adição de água, os produtos de hidratação ocupam o espaço disponível entre os sólidos, originalmente ocupado pela água, mas não completamente. A quantidade de espaço disponível depende da relação água/cimento do concreto, uma pasta de cimento com maior quantidade de água apresentará maior porosidade, enquanto uma pasta com menor quantidade de água, e portanto com menores vazios que necessitam de preenchimento e com uma microestrutura mais densa, resulta em um concreto mais resistente (ROY; IDORN, 1993, tradução nossa).

A hidratação do cimento é um processo gradual. Com o passar do tempo, os produtos de hidratação passam a ocupar uma parcela cada vez maior dos espaços originalmente ocupados pela água, reduzindo a porosidade do concreto e melhorando suas propriedades mecânicas

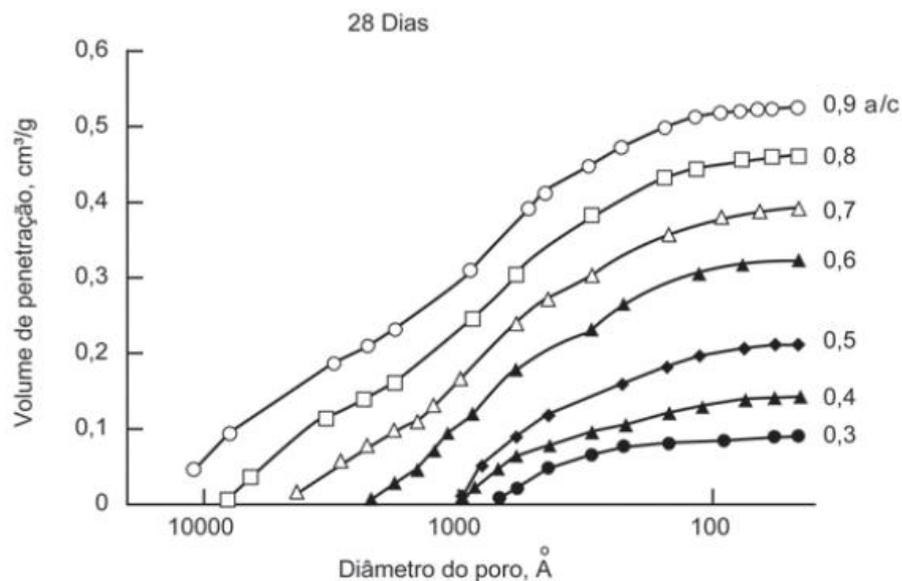
(ROY; IDORN, 1993, tradução nossa). A figura 3 mostra a evolução do diâmetro dos poros com o processo de hidratação, medidos através da porosimetria por intrusão de mercúrio. A figura 4 mostra a variação do diâmetro dos poros presentes em pastas de cimento hidratado com diferentes relações água/cimento, todos ensaiados em 28 dias, pelo mesmo processo de porosimetria.

Figura 3 – Distribuição dos poros na pasta de cimento hidratada em diferentes estágios de hidratação



(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 33)

Figura 4 – Distribuição dos poros na pasta de cimento hidratada em diferentes relações água/cimento



(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 33)

Os vazios presentes na pasta de cimento podem ser divididos em quatro categorias:

- a) vazios interlamelares no C-S-H;
- b) poros capilares;
- c) ar aprisionado;
- d) ar incorporado.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), os vazios interlamelares na estrutura do C-S-H são responsáveis por aproximadamente 28% da porosidade total do concreto. Porém, estes poros tem tamanho na escala de nanômetros, muito pequenos para afetarem a resistência do material. Neville (1997) afirma que, a rigor, todos os vazios influenciam a resistência do concreto, sejam eles provenientes de ar aprisionado, poros capilares ou vazios interlamelares, porém poros inferiores a 20nm têm efeito desprezível.

Os espaços não preenchidos pelos produtos de hidratação são responsáveis pela formação dos poros capilares. Estes vazios possuem dimensões entre 10nm e 5 μ m e podem ser divididos em microporos, menores que 50nm, e macroporos, maiores que 50nm. Os macroporos são, provavelmente, os principais responsáveis por alterações na resistência e durabilidade do concreto, enquanto os microporos influenciam mais os fenômenos de retração por secagem e fluência (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

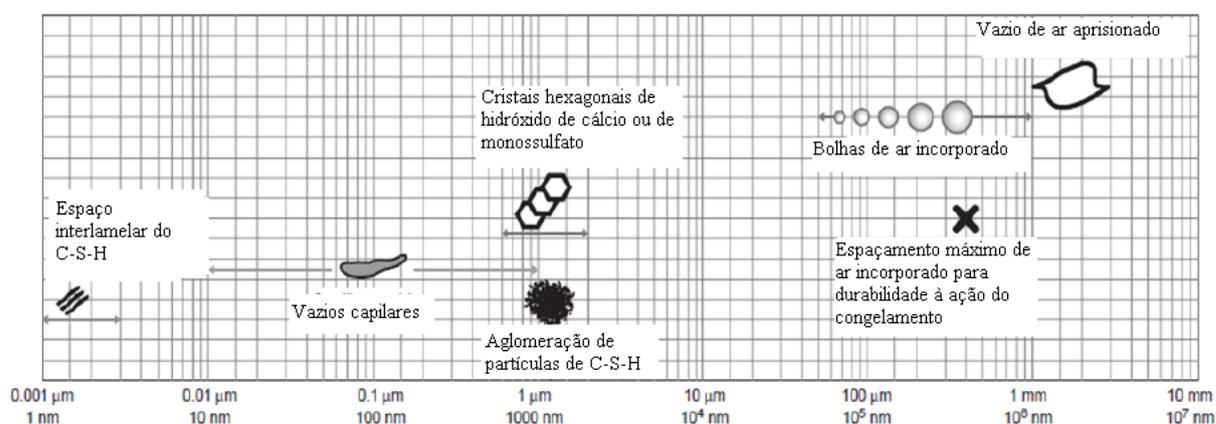
Os vazios capilares formam uma rede interligada distribuída aleatoriamente pela pasta de cimento. Esse sistema é o principal responsável pela permeabilidade da pasta hidratada, e conseqüentemente, pela maior parte das manifestações patológicas causadas pelo ingresso de agentes agressivos. Com o processo de hidratação, é possível que ocorra a colmatação destes canais, segmentando a rede. Os poros capilares neste caso somente são interligados pelos vazios interlamelares, com menores efeitos negativos nas características do concreto. Isso pode ocorrer em pastas de cimento hidratadas com relação água/cimento baixa e com cura adequada (NEVILLE, 1997).

Para relações água/cimento muito baixas é possível, em teoria, eliminar totalmente a presença de poros capilares na pasta de cimento completamente hidratada. Para Mehta e Monteiro (2008), este fenômeno ocorreria em relações água/cimento inferiores a 0,32. De acordo com Neville (1997), em relações água/cimento muito altas, superiores a 0,7, o bloqueio dos poros capilares é impossível, mesmo com a hidratação total da pasta de cimento.

O ar aprisionado no concreto possui formato esférico, diferentemente dos poros capilares, de formato irregular, e são introduzidos no concreto durante o processo de mistura. Eles são muito maiores do que os capilares, com dimensões chegando a 3 mm, gerando maiores consequências negativas sobre as características do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Bolhas de ar aprisionadas sob agregados maiores ou sob a armadura também são fontes de ar aprisionado. Sua presença depende da trabalhabilidade do concreto no estado fresco, podendo ser expelidas mais facilmente em misturas de alta trabalhabilidade, e com um processo de vibração adequado (NEVILLE, 1997).

Também podem ser incorporados vazios de ar propositalmente, através de aditivos incorporadores de ar. Os vazios de ar incorporado possuem dimensões reduzidas em comparação com o ar aprisionado acidentalmente, geralmente variando entre 50 e 200 μm , e, portanto, seus efeitos negativos também são reduzidos (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O concreto com ar incorporado é discutido com maior detalhes no item 3.4. A figura 5 representa a dimensão dos diversos sólidos e vazios presentes na pasta de cimento endurecida.

Figura 5 – Dimensão dos sólidos e vazios presentes na pasta de cimento hidratada



(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 31)

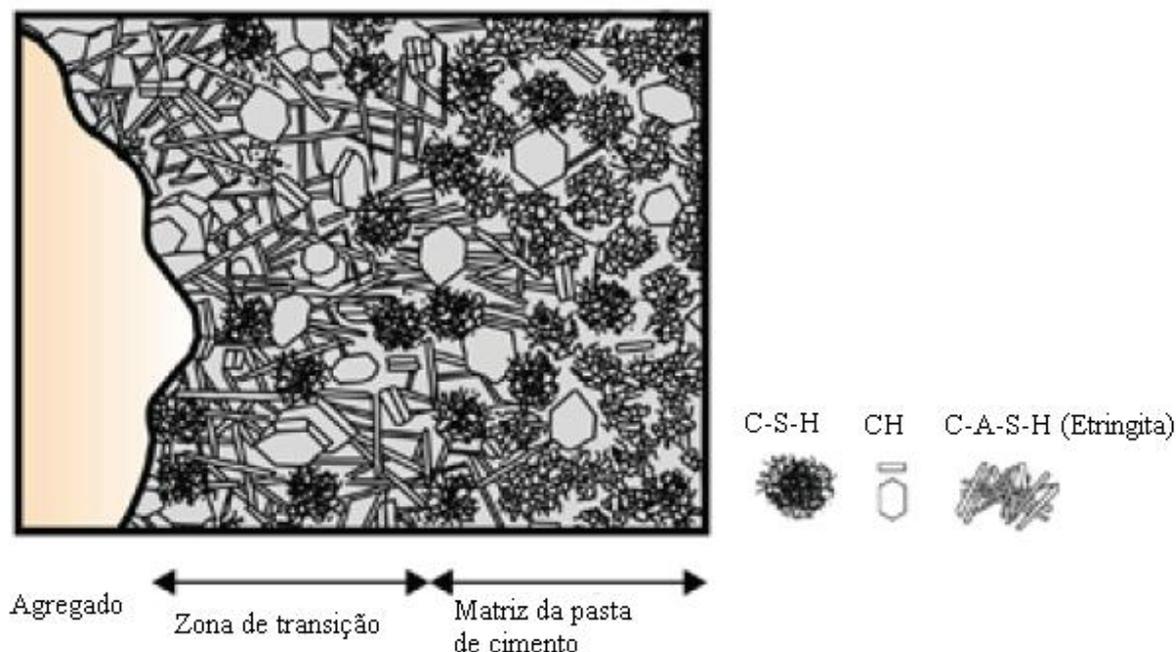
3.3 ZONA DE TRANSIÇÃO

Muitos estudos experimentais são realizados apenas em amostras de pasta de cimento puras ou argamassas, o que não é sempre representativo das características do concreto, pois não levam em conta a influência do agregado. A porosidade do concreto é superior à da pasta de cimento pura para uma mesma relação água/cimento. O concreto apresenta poros maiores, principalmente na região próxima aos agregados, e essa diferença aumenta com o processo de

hidratação (NEVILLE, 1997). Paulon (2005) acrescenta que o estudo da interface pasta-agregado é de grande importância devido aos fenômenos de aderência química e mecânica entre as duas fases. Mehta e Monteiro (2008) complementam que, com o passar do tempo, a resistência da zona de transição aumenta, podendo chegar a valores iguais aos da pasta de cimento. Isso ocorre pois os vazios encontrados entre os grandes cristais formados anteriormente são lentamente preenchidos devido a cristalização de novos produtos de hidratação e também pelas lentas reações químicas que podem ocorrer entre a pasta de cimento e os agregados. A figura 6 representa a microestrutura da zona de transição e da matriz da pasta de cimento no concreto.

Segundo Neville (1997), a zona de transição é um ponto fraco da estrutura do concreto. O adensamento das partículas de cimento seco ao redor dos agregados de maior dimensão é inferior em comparação com o restante da pasta de cimento, o que resulta em menos cimento disponível para hidratação e, conseqüentemente, uma porosidade muito superior na zona de transição. A porosidade é diretamente relacionada com a resistência e permeabilidade do concreto, o que explica as características inferiores do concreto nesta região. Paulon (2005) complementa que, devido a maior separação entre partículas de cimento, o processo de cristalização nesta região é diferente do restante da pasta de cimento. Primeiramente são formados cristais maiores do que no restante do concreto, o que ocasiona uma queda na resistência.

Figura 6 – Representação zona de transição do concreto



(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 43)

Paulon (2005) também afirma que a zona de transição no concreto, ao contrário da pasta de cimento, apresenta um comportamento fortemente anisotrópico, ou seja, ocorre uma grande concentração de tensões nesta região quando o material é submetido a esforços. Por isso o aparecimento de fissuras ocorre primeiramente nesta região. Além disso, a própria orientação dos cristais formados na zona de transição facilita a propagação de fissuras.

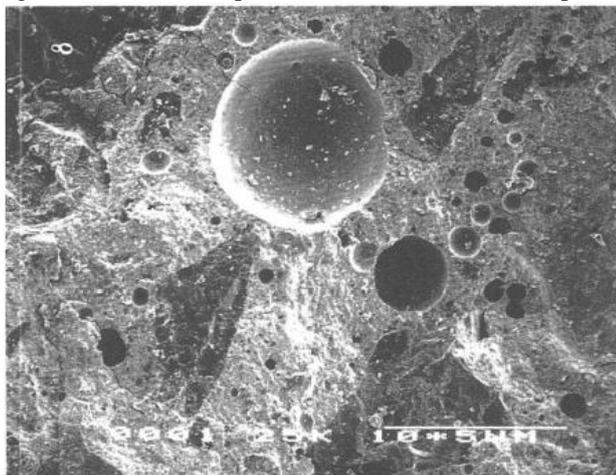
A zona de transição geralmente ocupa uma região de aproximadamente $50\mu\text{m}$ de espessura ao redor dos agregados. O espaço médio entre grãos de areia no concreto convencional é da ordem de $100\mu\text{m}$, aproximadamente igual à soma das zonas de transição de ambos agregados (PAULON, 2005). Isso mostra que esta região pode representar um volume considerável do concreto. Segundo Neville (1997), a zona de transição ocupa entre dois terços e metade do volume total da pasta de cimento.

3.4 CONCRETO COM AR INCORPORADO

Aditivos incorporadores de ar são produtos que introduzem uma quantidade controlada de pequenas bolhas de ar distribuídas uniformemente no concreto, introduzidas durante a mistura (DRANSFIELD, 2003, tradução nossa). Este processo ocorre devido ao carregamento da superfície das bolhas de ar, que se aderem às partículas de cimento e aos agregados

(EDMEADES; HEWLETT, 2003, tradução nossa). A figura 7, obtida com a utilização de um microscópio eletrônico de varredura, apresenta o sistema de poros em um concreto com ar incorporado.

Figura 7 – Sistema de poros – Concreto com ar incorporado



(fonte: RASHED; WILLIAMSON, 1991)

Neville (1997) ressalta que o ar intencionalmente incorporado ao concreto não pode ser confundido com o ar acidentalmente aprisionado. Enquanto os vazios de ar incorporado geralmente possuem diâmetro próximo de $50\mu\text{m}$, os vazios formados pelo ar aprisionado são muito maiores, com efeitos negativos muito superiores na durabilidade e resistência do material.

Segundo Neville (1997), certos tipos de cimento podem resultar em menor eficácia na incorporação de ar, como as misturas contendo cinza volante. O autor também ressalta a importância do controle do tempo de mistura do concreto. Misturas excessivas podem reduzir o teor de ar incorporado, enquanto misturas deficientes, com menos de 2 ou 3 minutos, podem ocasionar incorporação inadequada.

O *American Concrete Institute* (2008, tradução nossa) apresenta recomendações para os valores de ar incorporado ao concreto, dependentes da gravidade de exposição aos efeitos de gelo e degelo e do tamanho máximo dos agregados, apresentados na tabela 1. Exposição severa é definida quando o concreto é continuamente exposto à umidade antes do congelamento ou quando são utilizados sais para degelo enquanto exposição moderada é definida quando nenhum destes dois parâmetros é verdadeiro.

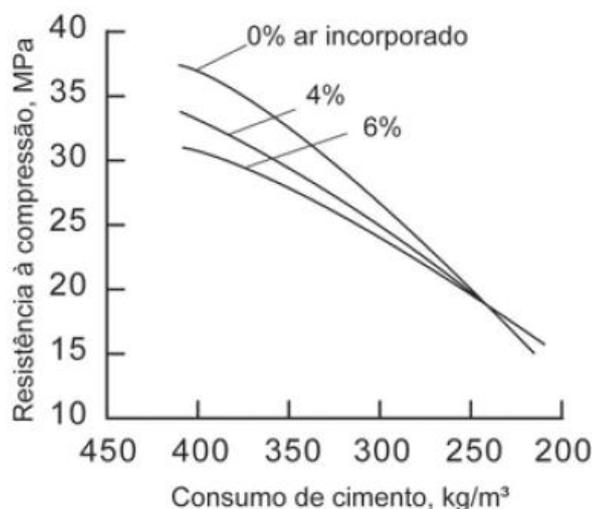
Tabela 1 – Teores de ar incorporado recomendados pelo ACI

Dimensão máxima do agregado (mm)	Teor de ar incorporado (%)	
	Exposição severa	Exposição moderada
9,5	7,5	6,0
12,5	7,0	5,5
19,0	6,0	5,0
25,0	6,0	4,5
37,5	5,5	4,5
50,0	5,0	4,0
75,0	4,5	3,5

(fonte: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008, p. 7)

É importante o controle da incorporação de ar pois a mesma reduz a resistência do concreto, devido ao aumento da porosidade inerente desta tecnologia. Esta redução é, tipicamente, na ordem de 5-6% para cada 1% de ar incorporado ao concreto (DRANSFIELD, 2003). Esta variação depende da relação água/cimento do concreto e do consumo de cimento. A diminuição da resistência é mais intensa em concretos com alto consumo de cimento. Concretos de baixo consumo de cimento sofrem reduções muito pequenas e podem até ganhar resistência. Este comportamento existe porque o aumento da compacidade do concreto no estado fresco resulta em uma melhor qualidade da zona de transição. O ganho de resistência na zona de transição pode compensar a perda de resistência devido ao aumento na porosidade da pasta de cimento, principalmente em concretos de baixa qualidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A figura 8 mostra os efeitos do consumo de cimento na resistência de concretos de diferentes consumos de cimento.

Figura 8 – Efeito da incorporação de ar na resistência do concreto para diferentes consumos de cimento



(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 55)

O transporte e bombeamento de concreto com aditivo incorporador de ar pode resultar na perda de uma parcela do ar incorporado, assim como o excesso de vibração. Estes efeitos são acentuados em concretos de alta trabalhabilidade (DRANSFIELD, 2003, tradução nossa). A utilização de outros aditivos em conjunto com o aditivo incorporador de ar pode afetar o volume e estabilidade do ar incorporado ao concreto, especialmente no caso de aditivos plastificantes ou superplastificantes (EDMEADES; HEWLETT, 2003, tradução nossa).

Segundo Elsen et al. (1994, tradução nossa), os principais parâmetros que podem afetar a qualidade do ar incorporado no concreto são:

- a) o fator de espaçamento (parâmetro teórico que representa a maior distância de qualquer ponto na pasta de cimento em relação à superfície de um vazio de ar). Sua principal importância é sua contribuição na resistência do material contra os efeitos de congelamento e degelo;
- b) a distribuição dos vazios de ar incorporado;
- c) o volume total de vazios de ar em relação ao volume total de concreto;
- d) o volume de vazios microscópicos em relação ao volume total de concreto, definidos por ele como vazios de ar de diâmetro igual ou inferior a 0,3 mm.
- e) a superfície específica total dos vazios de ar incorporados.

4 DURABILIDADE

Segundo Mehta e Monteiro (2008, p. 18, grifo dos autores), “**Durabilidade** é definida como expectativa de vida de um material sob determinadas condições ambientais.” Já a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007) indica que, como requisitos de durabilidade, as estruturas devem conservar sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante a sua vida útil. A vida útil, porém, não é definida com precisão na norma brasileira. A ACI 201.2R (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008, p. 4, tradução nossa), por sua vez, define durabilidade como “[...] a capacidade de resistir ao intemperismo, ataque químico, abrasão, ou qualquer outro processo de deterioração, mantendo sua forma original, qualidade e aptidão em serviço quando exposto ao seu ambiente de trabalho.”. O tempo de vida útil novamente não é especificado. A EN 206-1, por outro lado, define uma vida útil de pelo menos 50 anos para a especificação de estruturas de concreto nos países europeus membros do CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2000).

Pode-se observar que a definição exata do que deve ser uma estrutura durável pode ser complicada e é necessária uma evolução na regulamentação da construção que acompanhe a evolução do conhecimento obtido nessa área. Fatores como tempo de vida útil ou desempenho mínimo adequado precisam ser bem definidos para que as futuras construções não apresentem desempenho deficiente devido à falta de preocupação com a durabilidade durante a etapa de projeto (ANDRADE, T., 2005).

Neste capítulo são abordadas: a maneira como a questão da durabilidade das estruturas era tratada por profissionais do setor da construção civil no passado recente, a importância do estudo da durabilidade e a necessidade de uma visão holística no estudo deste assunto. Também são dedicados itens para o estudo da permeabilidade do concreto e da durabilidade de concretos com ar incorporado.

4.1 HISTÓRICO DA DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

O concreto armado é um material de alta durabilidade, Mehta e Monteiro (2008) e Andrade (T., 2005) citam essa característica como um dos principais fatores que levaram o concreto a soberania na construção civil. Apesar disso, o excesso de confiança nas suas qualidades pode ter resultado em estruturas que não apresentam o desempenho esperado sem intervenções, muitas vezes originando custos muito superiores aos inicialmente previstos.

Quando o concreto começou a ganhar espaço no setor da construção civil, do início do século XX até a década de 1980, a durabilidade das estruturas não era uma grande preocupação dos construtores, que ainda se baseavam apenas no bom senso e na experiência profissional nas decisões construtivas. Esse cenário tem mudado com a grande evolução no conhecimento técnico obtida nessa área recentemente (MEDEIROS et al., 2011).

Andrade (T., 2005) cita a evolução dos métodos construtivos resultantes das necessidades da construção civil Pós-Guerra como um dos motivos da durabilidade inadequada de muitas construções atuais. O aumento de produtividade e a diminuição dos custos necessários, neste período, resultaram na utilização de estruturas mais esbeltas e com menores cobrimentos, aumentando as tensões de trabalho. Isso levou a um aumento na tendência à fissuração das estruturas e uma diminuição na proteção das armaduras. Com o passar do tempo, tornou-se clara que a durabilidade destas estruturas de concreto armado era deficiente, levando a um grande aumento nos gastos com reparos. Com isso, foi necessário o desenvolvimento de estudos relacionados aos mecanismos de deterioração e a criação de normas mais restritivas nas características relacionadas à durabilidade. No Brasil, este processo de normatização começou na década de 1990.

Neville (1997) salienta que se acreditava que o conhecimento da resistência era suficiente para determinação da durabilidade, com poucas exceções. Consequentemente, os estudos na área tinham foco na obtenção de altas resistências. Nas últimas décadas, já se tem o conhecimento de que deve haver considerações específicas sobre a durabilidade das estruturas. Andrade (T., 2005) destaca a necessidade de promover o desenvolvimento do trabalho em conjunto do meio acadêmico e produtivo, um dos grandes desafios atuais na Engenharia Civil.

4.2 A IMPORTÂNCIA DA DURABILIDADE

Medeiros et al. (2011) comentam sobre as várias vantagens obtidas com o conhecimento sobre a durabilidade e vida útil dos materiais. É possível prever com maior precisão o comportamento das estruturas a longo prazo, evitar manifestações patológicas precoces e ainda construir com mais economia e sustentabilidade.

De acordo com Medeiros et al. (2011), estruturas que ao longo da sua vida útil apresentam baixa capacidade de resistir aos efeitos do intemperismo e ao ataque de agentes agressivos, geram custos adicionais, devido a gastos com reparos e manutenção; além de consumirem mais recursos, produzirem mais poluentes e ocasionarem maiores gastos energéticos. Portanto, o aumento da durabilidade das estruturas e, conseqüentemente, da sua vida útil, é uma boa solução tanto econômica como ecologicamente.

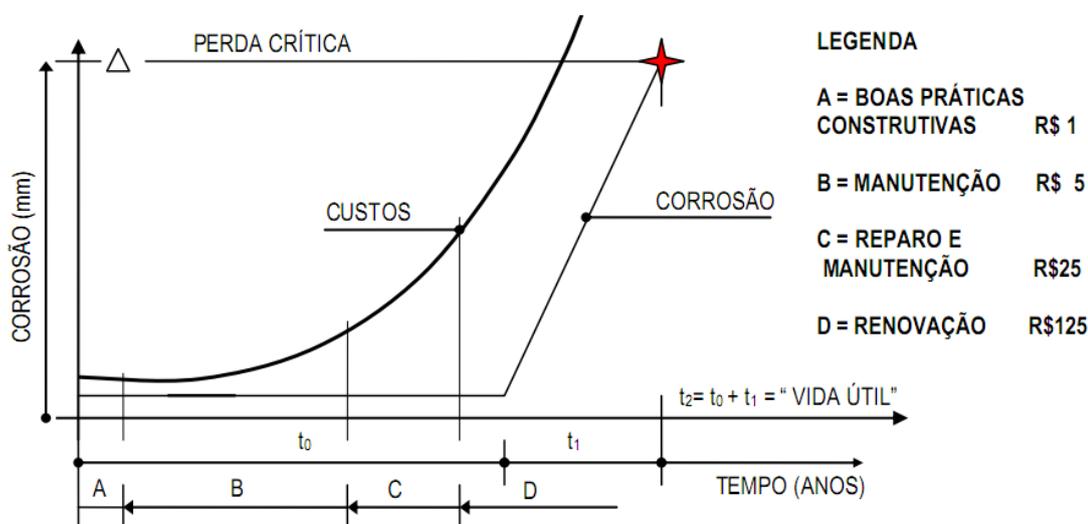
Em relação aos custos envolvidos em reparos de estruturas de concreto, é possível citar a “Lei dos Cinco” de Sitter² (1983 apud ANDRADE, T., 2005, p. 759). O autor divide o tempo de execução e uso da obra em quatro etapas:

- a) fase de projeto e execução;
- b) manutenção preventiva, quando ainda não existem danos na estrutura;
- c) reparo e manutenção, quando já são necessários reparos localizados;
- d) renovação, quando os danos na estrutura são graves e é necessária uma recuperação generalizada.

O autor estima que o custo gasto com intervenções em cada etapa cresce em razão geométrica de ordem cinco, ou seja, ações no período de manutenção preventiva custariam 5 vezes mais do que ações tomadas na fase de projeto, reparos localizados custariam 25 vezes mais e ações de renovação custariam 125 vezes mais. A figura 9 representa a progressão do custo das ações tomadas para reparo da estrutura, de acordo com a “Lei dos Cinco”. Os valores exatos do modelo não são importantes, mas a noção de que as ações necessárias devem ser tomadas ainda na fase de projeto é extremamente válida (ANDRADE, T., 2005).

² SITTER, W. R. Costs for Service Life Optimization the “Law of Fives”. In: COMITE EURO INTERNATIONAL DU BETON – CEB. *Anais...* Copenhagen, Denmark, 1983. p. 131-134.

Figura 9 – Gráfico da “Lei dos Cinco”



(fonte: SITTER³, 1983 apud ANDRADE, T., 2005, p. 759)

4.3 MODELO HOLÍSTICO DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

Existem diversas causas possíveis de deterioração no concreto armado. Andrade (T., 2005) as divide nas seguintes categorias, ou seja, causas:

- meccânicas, que incluem problemas como sobrecargas na estrutura e restrições aos movimentos devido à variação de temperatura. Geralmente se manifestam através do aparecimento de fissuras;
- físicas, como os efeitos da alta temperatura, congelamento e degelo e cristalização de sais. Os sintomas são variados, desde o aparecimento de fissuras até o lascamento do concreto;
- químicas, como a ação de sulfatos, as reações álcali-agregado e a corrosão da armadura. Expansão, fissuração ou dissolução química do concreto são algumas das manifestações que este tipo de deterioração pode ocasionar.

Mehta e Monteiro (2008) definem a visão holística como a consideração de todos os agentes de deterioração em conjunto, pois, na prática, os sintomas resultantes de um processo deletério no concreto facilitam à ação de novos processos agressivos. Por exemplo, a fissuração ocasionada por reações álcali-agregado possibilita o ingresso de outros agentes agressivos, como os cloretos. Medeiros et al. (2011) também destacam a necessidade de uma visão sistêmica para uma análise adequada da questão da vida útil em estruturas de concreto armado, devido à sinergia entre os diferentes mecanismos de deterioração do concreto. É

³ SITTER, W. R. **Costs for Service Life Optimization the “Law of Fives”**. Comitê Euro International du Beton – CEB. Boletim Técnico. Copenhagen, Denmark, n. 152, p. 131-134, 1983.

necessário que todas as etapas da construção sejam consideradas, desde o projeto até a execução e uso da estrutura.

Medeiros et al. (2011, p. 786) citam uma simplificação das ações que influenciam a durabilidade das estruturas, disponível na literatura técnica, que afirma:

[...] que a durabilidade da estrutura de concreto é determinada por quatro fatores identificados como regra dos **4C**:

- a) composição do traço do concreto;
- b) compactação ou adensamento efetivo do concreto;
- c) cura efetiva do concreto na estrutura;
- d) cobrimento das armaduras.

Além dos cuidados necessários durante a execução dos concretos, conforme já exposto, outro fator relevante que contribui para a durabilidade de uma estrutura é o ambiente onde ela está inserida. Fatores como temperatura, umidade relativa e incidência de chuvas, são importantes e segundo Lima (2005), devem ser considerados para previsões de vida útil.

Um fator comum na maioria das manifestações patológicas é a presença de água e, portanto, evitar o seu contato com o concreto é uma das melhores formas de prevenir sua deterioração (ANDRADE, T., 2005). Mehta e Monteiro (2008, p. 185) reforçam essa conclusão, pois indicam que “[...] em ordem decrescente de importância, as principais causas de deterioração das estruturas de concreto são corrosão da armadura, exposição aos ciclos de congelamento e degelo, reação álcali-agregado e ataques por sulfatos.”. Todas as causas mencionadas têm a presença de água como uma característica em comum.

4.4 PERMEABILIDADE

Segundo Neville (1997, p. 482, grifo do autor):

A rigor, a permeabilidade se refere ao escoamento de um fluido através de um meio poroso. No caso do concreto, o deslocamento dos diversos fluidos se efetua não somente por escoamento através do meio poroso, mas também por difusão e adsorção, de modo que o que interessa realmente é a **penetrabilidade** do concreto.

Apesar disso, na prática, a denominação permeabilidade é frequentemente utilizada com o mesmo sentido que penetrabilidade. Nepomuceno (2005) destaca a penetração de gases,

vapores e líquidos no interior do concreto armado, através da rede de poros e fissuras, como o principal motivo de degradação do material, e ressalta que a velocidade desta interação é importante para a determinação da vida útil do projeto. O autor destaca a água, que pode conter íons sulfatos ou de cloreto dissolvidos, o CO₂ e o oxigênio como os principais agentes na degradação do concreto armado.

Mehta e Monteiro (2008) também destacam a importância da baixa permeabilidade para um concreto de boa durabilidade, principalmente quando expostos à águas ácidas, devido à necessidade de proteção à alcalinidade da pasta de cimento. Basheer et al. (2001, tradução nossa) afirmam que muitos dos testes realizados para caracterizar a durabilidade do concreto consideram a penetração de agentes agressivos como a variável de controle, ressaltando a importância da permeabilidade para a vida útil das estruturas.

O sistema de poros do concreto é de grande importância para a sua permeabilidade. Porém, os menores poros presentes no concreto, os poros do C-S-H e os menores poros capilares, possuem um efeito muito pequeno. Apenas poros com diâmetro de pelo menos 120nm têm efeito significativo na permeabilidade. Fatores como poros descontínuos ou de outro modo ineficazes no transporte de fluídos, como no caso de poros grandes com entradas estreitas, também são determinantes (NEVILLE, 1997).

Bordallo et al. (2010, tradução nossa) ressaltam que, além da porosidade da pasta de cimento, é importante analisar o efeito das fissuras como acesso de agentes agressivos ao interior do concreto. Os autores observam que, em pastas de cimento com poros capilares descontínuos, como ocorre em concretos com baixa relação água/cimento, a presença de microfissuras pode ser o fator dominante na permeabilidade do material. Após o aparecimento de microfissuras de aproximadamente 20µm no concreto houve um aumento de várias ordens de grandeza na permeabilidade dos exemplares estudados. Segundo Neville (1997), a microfissuração, em conjunto com o sistema de poros, é um dos principais meios de transporte de fluídos para o interior do concreto. O autor destaca a contribuição da zona de transição na permeabilidade do concreto, devido à facilidade de fissuração da interface agregado-pasta de cimento. Apesar disso, Larbi⁴ (1993 apud NEVILLE, 1997, p. 482) observou que a zona de transição não tem tanta influência quanto se esperava, pois a pasta de cimento é a única fase contínua do concreto.

⁴ LARBI, L. A., Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete, Heron, Delft, The Netherlands, v. 38, No. 1, p. 1-69, 1993.

Os itens a seguir abordam os principais mecanismos de ingresso de agentes agressivos no concreto, com um destaque para o estudo da penetração de íons cloretos, assim como os dois ensaios utilizados neste trabalho para a medição da penetração destes agentes.

4.4.1 Mecanismos de transporte no concreto

Como mencionado no item 4.4, permeabilidade, a rigor, se refere somente a escoamentos sob pressão. Os outros principais mecanismos que possibilitam o ingresso de agentes agressivos no concreto são a difusão, processo comandado por diferenças de concentração, e a sorção, também referida como absorção capilar, processo no qual o fluído se movimenta por sucção capilar (NEVILLE, 1997).

A difusão é caracterizada pelo transporte de íons na solução de poros do concreto devido a diferenças de concentração em diferentes regiões, seguindo o fluxo da área de maior concentração até a área de menor concentração. Este é o único mecanismo que não depende da movimentação da água no interior do concreto (MEDEIROS, 2008).

Os dois principais gases que podem ingressar no concreto por meio da difusão são o dióxido de carbono (CO_2), o oxigênio e o vapor de água. O CO_2 é responsável pela carbonatação, processo que resulta na redução da alcalinidade do concreto e, conseqüentemente, na perda da proteção natural que ele oferece à armadura. O oxigênio é parte do processo de corrosão da armadura, além de outros processos de biodegradação. O vapor de água também é parte do processo de corrosão, entre outros processos de degradação (NEPOMUCENO, 2005)

Íons cloreto ou sulfato também podem ser introduzidos no interior do concreto através da difusão na água depositada nos poros interligados. Este processo é intensificado quando os poros estão saturados, mas também ocorre quando eles estão apenas parcialmente saturados. A presença de íons cloretos no interior do concreto é uma das principais causas de corrosão das armaduras do concreto armado (NEVILLE, 1997). Segundo Mehta e Monteiro (2008) o ingresso de sulfatos na estrutura promove, pelas reações deste agente com os produtos de hidratação do cimento, expansão e fissuração do concreto ou perda de massa e resistência.

A absorção por capilaridade é um dos mecanismos de transporte mais importantes no estudo da durabilidade do concreto, pois ele não necessita que o concreto esteja saturado, situação pouco comum na prática. As forças capilares são resultado da tensão superficial do líquido

que penetra nos poros do material e elas dependem tanto das características do líquido, sua viscosidade e densidade, como das características do sólido, a estrutura dos poros. Este mecanismo é especialmente importante em estruturas sujeitas à chuva ou ciclos de molhagem e secagem (NEPOMUCENO, 2005). Medeiros (2008) destaca que a capilaridade como um fator importante na contaminação do concreto por cloretos, devido ao processo cíclico de umedecimento e secagem em locais onde a fonte de água está contaminada com sais.

4.4.2 Ensaio de absorção capilar

No Brasil, a absorção de água no concreto pode ser medida através de dois métodos normalizados, através da NBR 9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005), que mede a absorção de água por permeabilidade com a imersão do corpo de prova e através da NBR 9779 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012), que mede a absorção do concreto por sucção capilar, além de métodos não normalizados. Segundo Nepomuceno (2005) e Neville (1997), os ensaios de absorção por capilaridade representam uma situação mais real do que os ensaios de permeabilidade, como no método de absorção por imersão, muito utilizados no passado para caracterizar a durabilidade do concreto. Enquanto os ensaios de permeabilidade são válidos, pois representam a conectividade dos poros, eles medem a resposta do concreto saturado e sob pressão hidráulica, condições pouco comuns nas estruturas. Com base nestes fatores, o ensaio realizado nesta pesquisa tiveram como base a NBR 9779.

A NBR 9779 também requisita o rompimento dos corpos de prova por compressão diametral, possibilitando a observação da profundidade da penetração de água no concreto. Para Nepomuceno (2005), além da quantidade de água absorvida pelo concreto armado, o nível de penetração é de grande importância devido ao seu efeito no processo de corrosão da armadura.

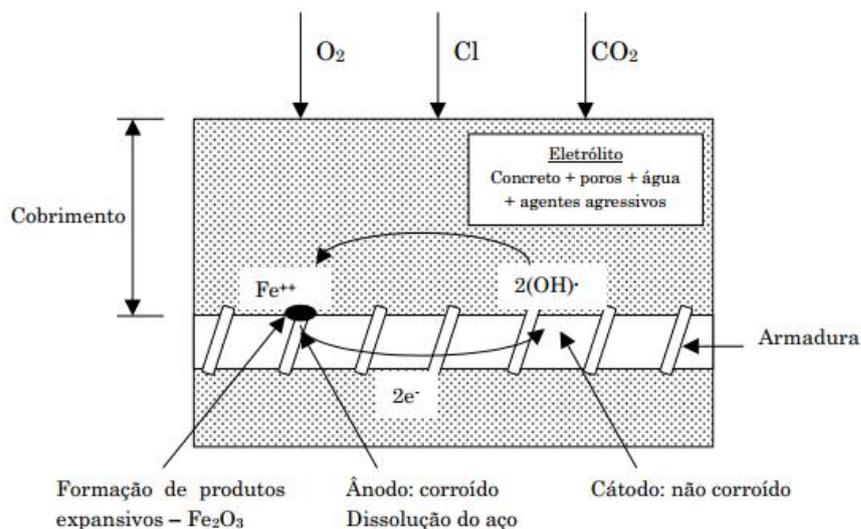
Como a sucção capilar depende da umidade interna do concreto, o ensaio envolve a secagem do corpo de prova a 105°C, processo que, segundo Nepomuceno (2005) e Ismail et al. (2013), recebe críticas, pois pode danificar a microestrutura do concreto. Os autores citam a possibilidade de utilização de temperaturas por volta de 60°C, principalmente no caso de estudos comparativos.

4.4.3 Penetração de íons cloreto

A penetração de cloretos no concreto pode ocorrer de várias formas, como descrevem diversos autores (ANDRADE, C., 1993, tradução nossa; NEPOMUCENO, 2005; NEVILLE, 1997; FIGUEIREDO, 2005.). Os íons podem existir no interior do material desde a execução, como no caso da utilização de aditivos aceleradores de pega que contém cloretos e na presença de impurezas na água ou nos agregados utilizados, ou eles podem ingressar no concreto através dos diversos métodos de migração, como a difusão, a absorção por capilaridade e a migração devido à diferença de potencial. Entre eles, o mecanismo de difusão é o mais estudado por pesquisadores. Segundo Mehta e Monteiro (2008), a durabilidade das estruturas em ambientes marinhos necessita de atenção especial, devido, em grande parte, à presença de cloretos na atmosfera nestas regiões. Os autores ressaltam que a presença de íons cloreto é de grande importância pois, em concentração suficientemente alta, eles possibilitam a corrosão da armadura mesmo em ambientes com pH alto, situação na qual o aço é, geralmente, protegido contra o processo de corrosão.

De acordo com Neville (1997), a corrosão ocorre na presença de uma diferença de potencial elétrico no interior do concreto, com a formação de uma zona anódica e uma catódica. Andrade (J. J. de O., 2001) resalta que é necessária a possibilidade do transporte de íons e elétrons no interior do concreto para que a corrosão ocorra. Os elétrons geralmente se movimentam através do metal enquanto os íons se movimentam por dissolução e migração via solução, através do eletrólito. A figura 10 representa um modelo do processo de corrosão da armadura no concreto.

Figura 10 – Modelo do processo de corrosão da armadura



(fonte: ANDRADE, J. J. de O., 2001, p. 23)

Segundo Torres (2011), o processo de corrosão cria uma célula eletroquímica na superfície do metal, que tem como produtos da reação química óxidos e hidróxidos de ferro, um material avermelhado, heterogêneo, poroso e de baixa aderência. Mehta e Monteiro (2008) complementam afirmando que esse processo pode gerar produtos com volume na ordem de seis vezes maiores do que o material original, causando a expansão e fissuração do concreto.

De acordo com Torres (2011), os seguintes fatores caracterizam a velocidade e profundidade de penetração de íons agressivos no concreto:

- a) tipo de cimento;
- b) porosidade, comandada pela relação água/cimento e pela qualidade de execução do concreto;
- c) nível de saturação dos poros no interior do concreto;
- d) concentração dos íons de cloreto;
- e) presença de fissuração.

4.4.4 Ensaio de penetração de íons cloretos

O método mais utilizado para caracterização da resistência do concreto à penetração de cloretos é o ensaio normatizado pela ASTM C1202 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012). O ensaio consiste, basicamente, na medição da carga que passa através de uma amostra de concreto submetida a uma diferença de potencial. Estes valores são

relacionados qualitativamente com a susceptibilidade do concreto à penetração de íons cloreto (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS C1202, 2012).

Apesar de ser amplamente utilizado, este método sofre severas críticas, principalmente devido à falta de base teórica sobre o procedimento e as condições extremas do ensaio sobre a qual o concreto é submetido. Andrade (C., 1993, tradução nossa) afirma que o ensaio não reproduz uma situação real e não é capaz de informar com precisão a permeabilidade do concreto à íons cloreto. A autora enfatiza que a variável medida, a corrente, não corresponde diretamente com o fluxo de cloretos. Também salienta que as altas temperaturas observadas durante o ensaio, podem alterar a velocidade de ingresso dos íons. Ismail et al. (2013, tradução nossa), também acreditam que o método pode vir a sofrer interferências (modificação da condutividade) caso existam alterações na solução nos poros do concreto.

O próprio texto da ASTM C1202 orienta que o ensaio somente é aplicável quando a correlação entre o procedimento e testes lentos de penetração de cloretos já tenha sido estudada anteriormente, apesar de sua utilização, na prática, ter sido difundida para qualquer tipo de concreto. Shi (2004) cita os estudos realizados por Pfeifer et al.⁵ (1994, apud SHI, 2004, tradução nossa) e Shane et al.⁶ (1999, apud SHI, 2004, tradução nossa), nos quais a correlação da carga elétrica passante e da penetração de cloretos não foi satisfatória quando analisados concretos com adições de diversas composições.

Shi (2004, tradução nossa) e Ismail et al. (2013, tradução nossa) indicam testes de migração como alternativa para ensaios acelerados de penetração de cloretos, como o método desenvolvido por Tang e Nilsson⁷ e normatizado pela NordTest como *NT Build 492* (NORDTEST, 1999, tradução nossa). O método consiste na utilização de uma corrente elétrica para acelerar o processo de difusão de cloretos no interior de um corpo de prova de concreto com 50mm de espessura. A penetração de cloretos é então medida visualmente e utilizada no cálculo do coeficiente de difusão. Medeiros (2008) cita como vantagens dos ensaios de migração a rapidez com que os resultados são obtidos e a utilização de parâmetros

⁵ PFEIFER, D., MCDONALD, D., KRAUSS, P. The rapid chloride test and its correlation to the 90-day chloride ponding test, **PCI Journal**, Chicago, v. 39, No. 1, p. 38-47, 1994.

⁶ SHANE, J. D., ALDEA, C. M., BOUXSEIN, N. F., MASON, T. O., JENNING, H. M., SHAW, S. P. Microstructural and pore solution changes induced by rapid chloride permeability test measured by impedance spectroscopy., **Concrete Science and Engineering**, Bagneux, France, v. 1, No. 2, p. 110-119, 1999.

⁷ TANG, L., NILSSON, L. Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electric field, **Materials Journal**, Farmington Hills, USA, v. 89, No. 1, p. 49-53, 1993.

diretamente relacionados com a penetração de cloretos. Shi (2004, tradução nossa) afirma que os ensaios de migração apresentam uma menor variação quando comparados com o ensaio normatizado pela ASTM C 2012, além de não sofrerem interferência devido a composição química da solução dos poros do concreto. Devido a estes fatores, foi escolhido o teste de migração de cloretos segundo o método proposto pela *NT Build 492* como medição da suscetibilidade do concreto à ação de cloretos.

4.5 DURABILIDADE DO CONCRETO COM AR INCORPORADO

De acordo com Murphy et al. (2009, tradução nossa), o principal benefício do uso de incorporadores de ar é o aumento da durabilidade do concreto, principalmente como proteção contra os efeitos do congelamento da água presente no interior do material. Os autores citam Sutter⁸ (2007 apud MURPHY et al., 2009, tradução nossa), afirmando que o ar incorporado também aumenta a trabalhabilidade do concreto e reduz a segregação e a exsudação. Isso ocorre porque os vazios de ar agem como partículas finas, diminuindo o atrito entre os sólidos presentes no concreto no estado fresco.

A incorporação de ar aumenta a resistência do concreto aos efeitos dos ciclos de congelamento e degelo devido ao alívio de tensões nos capilares presentes no material. Os vazios de ar, de dimensão maior do que os capilares e não saturados, permitem a expansão natural resultante do processo de congelamento da água (ELSEN et al., 1994, tradução nossa). Na ausência de vazios de ar que possibilitam a expansão gerada pelo congelamento, as tensões, aplicadas nas paredes dos pequenos capilares saturados, podem gerar fissuração e lascamento do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Sobre a permeabilidade de concretos com ar incorporado em relação à diversos agentes agressivos, estudos realizados por Wong et al. (2011, tradução nossa) mostraram que, para uma mesma relação água/cimento, a incorporação de ar pode ter efeitos variáveis. Na condição não saturada, os exemplares com ar incorporado apresentaram melhores resultados nos ensaios de absorção por capilaridade e condutividade elétrica. A queda na absorção pode ser explicada pelo fato dos poros de ar incorporado exercerem menores pressões capilares e demorarem mais tempo para se saturarem. Já a condutividade, que ocorre através do fluxo de

⁸ SUTTER, L. L. **Evaluation of Methods for Characterizing Air Void Systems in Wisconsin Paving Concrete**. Madison, USA: Michigan Tech Transportation Institute, June 2007. Technical Report. No. WHRP 07-05.

íons em solução aquosa, sofre uma diminuição devido à presença de vazios de ar que agem como um material isolante. O efeito, neste caso, é similar ao do aumento na fração de agregados no concreto.

Com a saturação completa dos poros, por outro lado, os exemplares com ar incorporado apresentaram maior condutividade. Houve também um aumento na taxa de penetração de gases por permeabilidade e por difusão. É importante ressaltar que este estudo não tomou vantagem da maior trabalhabilidade resultante da incorporação de ar, que possibilita a redução da relação água/cimento e resulta em melhorias nos parâmetros relacionados a durabilidade (WONG et al., 2011, tradução nossa).

Khedr et al. (2006, tradução nossa), da Universidade Americana do Cairo, realizaram ensaios relacionados a durabilidade do concreto com ar incorporado sob ataque químico severo. Os autores observaram que, em concretos de mesma trabalhabilidade, a incorporação de ar na ordem de 5-7% resultou em consideráveis diminuições na perda de massa de concretos sujeitos a ataques por ácido sulfúrico, cloreto de cálcio e sulfato de amônia. Foi observado que, apesar de incomum, a utilização de ar incorporado ao concreto pode ser uma solução interessante mesmo em climas quentes, especialmente em ambientes sujeitos à ataques químicos, como em sistemas de esgoto.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com o objetivo de analisar as características de durabilidade de concretos com ar incorporado, foi desenvolvido um programa experimental que possibilitou a análise da absorção de água por capilaridade e de migração de cloretos, considerando as possíveis variações na microestrutura da matriz decorrentes dos diferentes tempos de mistura adotados na confecção dos concretos. Neste capítulo, são abordados, sequencialmente, os materiais utilizados, o processo de produção dos concretos e os ensaios realizados.

5.1 MATERIAIS

Este item apresenta uma descrição detalhada das características físico/químicas dos materiais utilizados neste programa experimental.

Para a produção dos concretos foi utilizado **cimento Portland de Alta Resistência Inicial** (CP V ARI). A escolha deste cimento baseou-se no fato do mesmo não apresentar adições pozolânicas, que podem alterar o desempenho do aditivo incorporador de ar. A tabela 2 apresenta a caracterização físico/química do produto, disponibilizada pelo fabricante.

Tabela 2 – Caracterização físico/química do cimento

	Unidade	Resultado	Limite	Método de ensaio	
Ensaio Químicos					
Resíduo insolúvel (RI)	%	0,61	≤ 1,0	ABNT NM 15/12	
Perda ao fogo (PF)	%	3,47	≤ 4,5	ABNT NM 18/12	
Óxido de Magnésio (MgO)	%	1,22	≤ 6,5	ABNT NM 21/12	
Trióxido de Enxofre (SO ₃)	%	2,73	≤ 4,5	ABNT NM 16/12	
Anidrido carbônico (CO ₂)	%	2,53	≤ 3,0	ABNT NM 20/12	
Ensaio Físicos					
Área específica - Blaine	cm ² /g	4687	≥ 3000	ABNT NM 76/98	
Massa específica	g/cm ³	3,09	-	ABNT NM 23/01	
Resíduo na peneira #200	%	0,04	≤ 6,0	ABNT NBR 11579/91	
Resíduo na peneira #325	%	0,65	-	ABNT NBR 9202/85	
Água de consistência normal	%	30,7	-	ABNT NM 43/03	
Início de pega	min	120	≥ 60	ABNT NM 65/03	
Fim de pega	min	178	≤ 600	ABNT NM 65/03	
Expansibilidade à quente	mm	0,00	≤ 5,0	ABNT NBR 11582/91	
Ensaio Mecânicos					
Resistência à compressão	1 dia	MPa	30,9	≥ 14,0	ABNT NBR 7215/96
	3 dias	MPa	45,5	≥ 24,0	ABNT NBR 7215/96
	7 dias	MPa	50,7	≥ 34,0	ABNT NBR 7215/96
	28 dias	MPa	55,6	-	ABNT NBR 7215/96

(fonte: adaptado de BRENNAND CIMENTOS, 2013, p. 1)

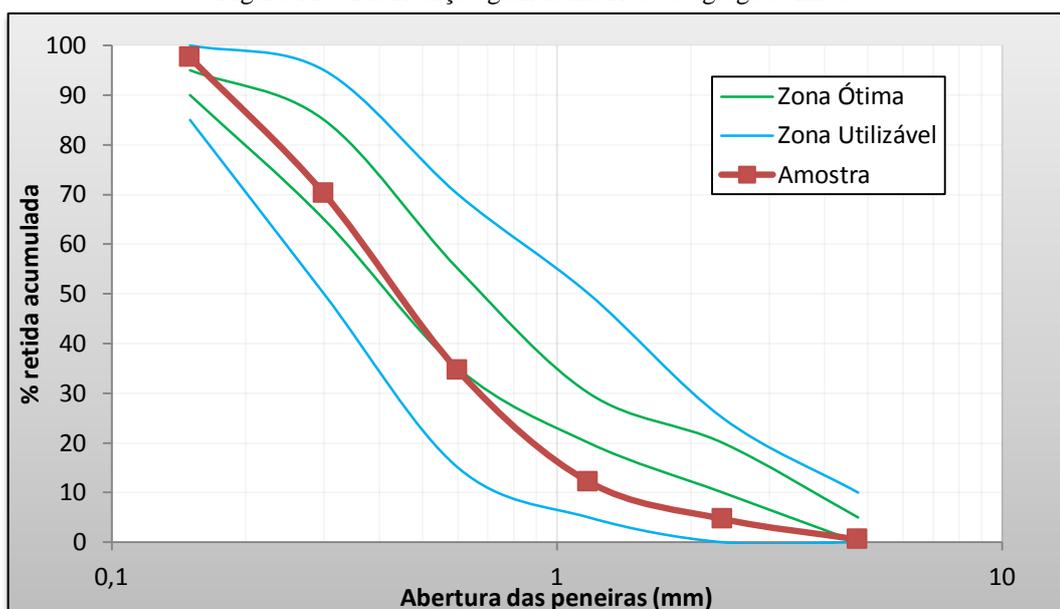
Como **agregado miúdo**, foi utilizado areia natural de origem quartzosa, proveniente do rio Jacuí. A tabela 3 e a figura 11, apresentam, respectivamente, a caracterização física do agregado, sua distribuição granulométrica e os limites de granulometria recomendados pela NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009).

Tabela 3 – Caracterização física do agregado miúdo

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Abertura da peneira (mm)	Porcentagem retida (%)	
Composição granulométrica	NM 248/03		Individual	Acumulada
		4,75	1	1
		2,36	4	5
		1,18	7	12
		0,60	22	35
		0,30	36	70
		0,15	27	98
		< 0,15	2	100
Modulo de finura	NM 248/03	2,20		
Dimensão máxima característica	NM 248/03	2,4 mm		
Massa unitária	NM 45/06	1,50 g/cm ³		
Massa específica	NM 52/09	2,64 g/cm ³		

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 11 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo



(fonte: elaborado pelo autor)

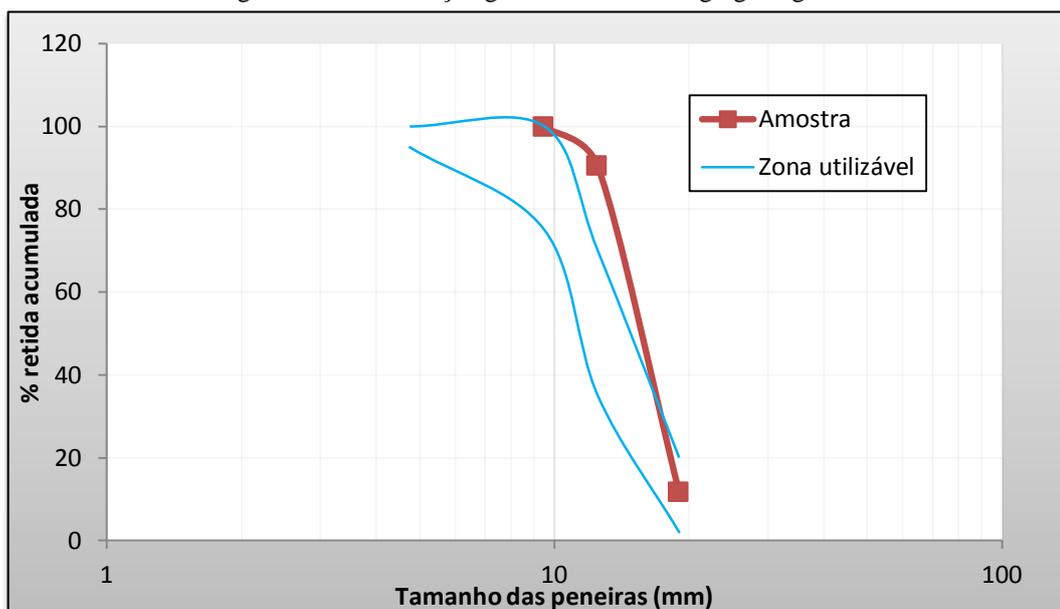
Como **agregado graúdo** foi utilizado brita de origem basáltica, oriunda de jazida da região. As características físicas e a sua distribuição granulométrica são apresentadas na tabela 4 e na figura 12, respectivamente.

Tabela 4 – Caracterização física do agregado graúdo

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Abertura da peneira (mm)	Porcentagem retida	
Composição granulométrica	NM 248/03		Individual	Acumulada
		19	12	12
		12,5	79	90
		9,5	9	100
		4,75	0	100
		2,36	0	100
		1,18	0	100
		0,6	0	100
		0,3	0	100
		0,15	0	100
		< 0,15	0	100
Modulo de finura	NM 248/03	7,11		
Dimensão máxima característica	NM 248/03	25 mm		
Massa unitária	NM 45/06	1,38 g/cm ³		
Massa específica	NM 52/09	2,98 g/cm ³		

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 12 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo



(fonte: elaborado pelo autor)

Anteriormente ao seu uso, os agregados foram lavados, para a retirada de impurezas, e secos ao ar. Após este processo, foram armazenados em ambiente de laboratório.

Para a produção do concreto foi utilizada **água** proveniente da rede de abastecimento pública local.

Para a produção dos concretos com ar incorporado foi utilizado um **aditivo** em pó, inorgânico, a base de sais aniônicos de procedência alemã. Muito usado na Alemanha, esta pesquisa tem o objetivo de avaliar se é adequado ao mercado brasileiro.

5.2 ESTUDO PILOTO

Em função do aditivo incorporador de ar utilizado nesta pesquisa experimental, não estar disponível comercialmente no Brasil, pouco se sabe sobre o comportamento de concretos com a adição destes produtos. Em função disso, previamente à execução do programa experimental, se fez necessário o desenvolvimento de um estudo piloto. O estudo permitiu a realização do ajuste do traço e a definição do teor ótimo do aditivo.

Devido à restrição de material, não foi possível utilizar o mesmo tipo de cimento para toda a pesquisa. Para o estudo piloto foi utilizado cimento CPV ARI RS (cimento de alta resistência inicial resistente a sulfatos) e para o programa experimental foi utilizado cimento CPV ARI

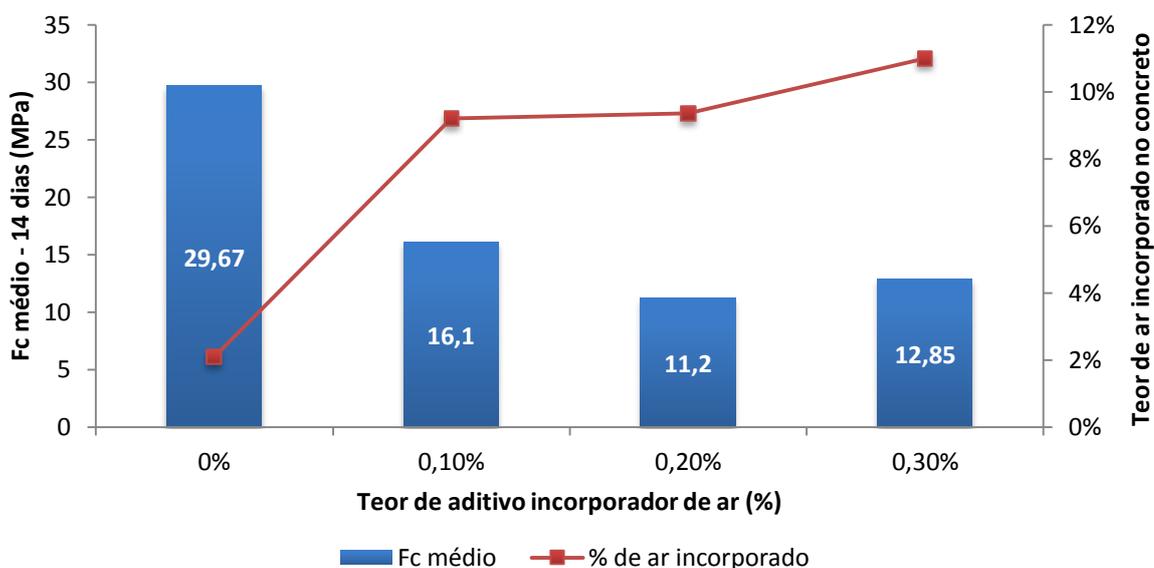
(cimento de alta resistência inicial). A tabela 5 e a figura 13 apresentam os resultados de resistência à compressão axial, segundo a NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), obtidos aos 14 dias, e o teor de ar incorporado nas misturas, segundo a NBR NM 47 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002), em função do teor de aditivo utilizado. Devido a execução de apenas uma betonada, com a adaptação do teor de aditivo após a moldagem dos corpos de prova para cada teor analisado, não foi possível fixar o tempo de mistura, o aumento do teor do aditivo era realizado com base na quantidade de concreto que restava na betoneira. Assim, os traços com maior teor de aditivo também apresentaram maior tempo de mistura.

Tabela 5 – Resultados de resistência à compressão axial e do teor de ar incorporado em função da variação do percentual de aditivo - Estudo Piloto

Teor de aditivo	Teor de ar incorporado	Resistência à compressão axial aos 14 dias (MPa)			
		CP 1	CP 2	CP 3	MÉDIA
0%	2,10%	32,0	28,2	28,8	29,67
0,1%	9,20%	16,9	15,3	-	16,10
0,2%	9,35%	14,1	8,3	-	11,20
0,3%	11,00%	13,0	12,7	-	12,85

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 13 – Resultados de resistência à compressão axial e do teor de ar incorporado em função da variação do percentual de aditivo



(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados da figura 13 mostram que a quantidade de ar incorporado ao concreto foi superior ao recomendado pelo *American Concrete Institute* (2008). Para agregados de dimensão nominal máxima de 25 mm, utilizados neste trabalho, o ACI recomenda que a incorporação de ar nos concretos seja da ordem de 6% para condições severas de exposição e de 4,5%, para condições moderada de exposição.

De acordo com os resultados obtidos, foi definido que o teor do aditivo incorporador de ar para a segunda etapa da pesquisa seria de 0,15%. Este valor foi escolhido, apesar da queda de resistência observada nos concretos e do alto teor de ar incorporado, pois ele já se encontra abaixo do limite recomendado pelo fabricante, pelo desconhecimento sobre os efeitos do tempo de mistura, maiores nos corpos de prova com teores de aditivo mais elevados também pelo fato das especificações americanas terem sido desenvolvidas com aditivos e materiais diferentes dos empregados neste trabalho.

Todo o programa experimental foi desenvolvido no laboratório de materiais e de tecnologia do ambiente construído (LAMTAC).

5.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO

Nos próximos itens são apresentados, detalhadamente, o processo de mistura, moldagem e cura dos concretos, correspondentes ao Programa Experimental.

5.3.1 Mistura dos materiais

A mistura dos materiais foi realizada em uma betoneira de eixo horizontal, previamente imprimada. Foi utilizada a seguinte ordem de colocação dos materiais na betoneira: brita, água (uma fração), cimento, areia e o restante da água. Nos traços que utilizaram o aditivo incorporador de ar, o mesmo foi adicionado ao final da mistura, cronometrando o tempo de mistura. A tabela 6 apresenta o traço utilizado na produção dos concretos do Programa Experimental.

Tabela 6 – Relação água/cimento e traço unitário

Relação água/cimento	m	Traço
0,48	5	1:2,18:2,82

(fonte: elaborado pelo autor)

Durante a produção do primeiro traço (concreto de referência) foi definida a quantidade de água, e conseqüentemente, a relação água/cimento que seria utilizada em todos os concretos. Como parâmetro de controle, determinou-se uma trabalhabilidade equivalente a um abatimento de tronco de cone (*slump test*) de 80 ± 20 mm, realizado previamente à adição do aditivo incorporador de ar.

Conforme já mencionado, para melhor análise do comportamento do concreto com a utilização do aditivo incorporador de ar foi determinado que a relação água/cimento seria mantida constante para todas as misturas ($a/c=0,48$), mesmo que esta escolha implicasse em modificações na trabalhabilidade entre o concreto de referência e o concreto com aditivo, que possui características plastificantes.

Objetivando avaliar a influência do aditivo no concreto foram estabelecidos quatro distintos tempos de mistura: 5, 20, 45 e 90 minutos, referidos no restante deste trabalho como T1, T2, T3 e T4. O início da medição do tempo de mistura ocorreu imediatamente após a aplicação do aditivo. Após cada intervalo de tempo pré-definido foram retiradas amostras para moldagem de corpos de prova e para o ensaio de determinação do teor de ar incorporado em concreto fresco, segundo a norma NBR NM 47 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002). Após o tempo de mistura T1 e T4 também foi realizada a medição do abatimento de tronco de cone. O mesmo não foi realizado nos tempos T2 e T3 para evitar intervalos excessivos. Durante a moldagem dos corpos de prova e realização dos ensaios, processo com duração de aproximadamente 5 minutos, a betoneira era desligada e este tempo desconsiderado como tempo de mistura. A tabela 7 apresenta os resultados dos teores de ar incorporado e dos abatimentos de tronco de cone, em função dos tempos de mistura analisados para os concretos estudados.

Tabela 7 – Percentual de ar incorporado nos concretos e abatimento de tronco de cone em função do tempo de mistura

Tempo de mistura (min)	Teor de ar incorporado (%)				Abatimento de tronco de cone (mm)			
	Referência		Aditivo		Referência		Aditivo	
	Betonada 1	Betonada 2	Betonada 1	Betonada 2	Betonada 1	Betonada 2	Betonada 1	Betonada 2
5	2,6	2,5	9,5	9,9	80	80	165	160
20	2,5	2,5	11	11,5	-	-	-	-
45	3,2	3,4	8,8	10	-	-	-	-
90	5,4	5,8	4,9	5,4	0	0	35	25

(fonte: elaborado pelo autor)

De acordo com a análise da tabela 7, observa-se que o teor de ar incorporado para os concretos com aditivo, ultrapassaram os limites recomendados pelo ACI, semelhantemente ao verificado no estudo piloto. Para tempos de mistura de até 20 minutos, ocorreu um aumento da incorporação de ar nos concretos. Para tempos de mistura superiores a 20 minutos, houve uma redução do teor de ar incorporado dos concretos. Esta redução chegou a valores semelhantes aos da mistura de referência para um tempo de 90 minutos.

A adição do aditivo (tabela 7) nos concretos ocasionou um grande aumento no abatimento de tronco de cone em relação às misturas de referência (superior a 100%). Enquanto o concreto de referência apresentou valores na ordem de 80 mm, o concreto com ar incorporado apresentou abatimento na ordem de 160 mm. Este aumento na trabalhabilidade em função do uso do aditivo poderia ter sido evitado reduzindo a relação água/cimento dos concretos com aditivo. A baixa trabalhabilidade obtida aos 90 minutos pode ser resultante da perda de água e ar incorporado à atmosfera e pela proximidade do tempo efetivo desde a adição de água estar próximo do tempo de início de pega do cimento utilizado (120 minutos).

5.3.2 Moldagem dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de dimensão 10x20cm, de acordo com as prescrições da NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). Em função do grande número de corpos de prova destinados aos ensaios mecânicos e de durabilidade, além da quantidade de concreto necessária para o ensaio de ar incorporado,

determinou-se que para cada traço (referência e com aditivo), seriam rodadas duas betonadas de concreto. Os corpos-de-prova destinados tanto para os ensaios mecânicos (ROSA, 2013) quanto para os ensaios de durabilidade foram provenientes de ambas betonadas.

5.3.3 Cura

Ao final das moldagens, para evitar a perda de água superficial dos concretos, os corpos de prova permaneceram cobertos com sacos plásticos por 24 horas. Após este período, foram desmoldados e armazenados em câmara úmida até a idade dos ensaios. Os corpos de prova destinados ao ensaio de absorção por capilaridade foram mantidos em cura por 20 dias, quando foram transportados para estufa para o processo de secagem, de acordo com os procedimentos normativos do ensaio. Para os testes de migração de cloretos, os corpos de prova foram mantidos em cura úmida por 25 dias.

5.4 ENSAIOS REALIZADOS

Os itens a seguir apresentam uma breve descrição dos ensaios de durabilidade realizados neste trabalho.

5.4.1 Ensaio de absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água utilizado neste trabalho foi baseado na norma NBR 9779 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012), que prescreve o método de determinação da absorção através da ascensão capilar. O ensaio consiste em diversas medições de massa de um corpo de prova, previamente seco em estufa até a constância de massa, mantido imerso em nível de água igual a 5 mm acima de sua face inferior. A figura 14 apresenta o ensaio em execução. A norma recomenda que o processo de secagem ocorra a 105° C, porém para este trabalho este processo foi realizado a 60° C para evitar potenciais danos à microestrutura do concreto, conforme recomendado por autores como Nepomuceno (2005) e Ismail et al. (2013).

Figura 14 – Ensaio de absorção por capilaridade



(fonte: elaborado pelo autor)

Para obtenção da absorção de água em cada tempo de ensaio, a diferença de massa dos corpos de prova em relação à sua massa seca é dividida pela sua área transversal, de acordo com a fórmula 1. O resultado da equação é expresso em g/cm².

$$C = \frac{A-B}{S} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

C = absorção de água, em g/cm²;

A = massa do corpo de prova em contato com a lâmina de água por um período especificado, em g;

B = massa do corpo de prova seco, em g;

S = área da seção transversal do corpo de prova, em cm².

Para visualização da altura máxima de ascensão capilar no interior da amostra, após o encerramento do ensaio (ao final das 72h), os corpos de prova foram rompidos axialmente por compressão diametral, segundo a NBR 7222 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011).

5.4.2 Ensaio de migração de íons cloretos

O ensaio de migração de íons cloretos foi realizado através do método NT 492 (NORDTEST, 1999), modificado para adaptação do equipamento utilizado nos testes de penetração de cloretos ASTM C 1202 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012). O procedimento consiste na aplicação de uma corrente elétrica através de uma fatia de concreto de 50 mm, para acelerar o processo de difusão de cloretos provenientes de uma solução presente em uma das faces da amostra. Como solução catódica é utilizada uma solução de 10% de cloreto de sódio, em massa, e como solução anódica é utilizada uma solução de 0.3N de hidróxido de sódio, ambas dissolvidas em água.

A voltagem aplicada é variável, dependente da permeabilidade do concreto. É aplicada uma voltagem inicial de 30V, a partir da qual é observada a corrente elétrica em cada corpo de prova e com base nesse parâmetro a voltagem é adaptada, se necessário. Para este trabalho foram utilizadas voltagens de 25V e 30V e, como foram ensaiados seis corpos de prova simultaneamente, foi utilizada a voltagem indicada para a maioria dos corpos de prova de cada ensaio.

O método prescreve a utilização de apenas uma fatia de concreto por corpo de prova, retirada da porção central do mesmo. Porém, para este trabalho, foram retiradas duas fatias por corpo de prova. Medeiros et al. (2009) chegaram à conclusão de que não há alteração no coeficiente de difusão de cloretos devido a utilização de até três fatias do interior de um cilindro de 200 mm de comprimento, desde que não sejam utilizadas as faces inferior ou superior do cilindro.

Após o corte das amostras, as mesmas foram impermeabilizadas lateralmente com resina epóxi. Em seguida, os corpos de prova foram pré-condicionados à vácuo em um dessecador. Primeiramente foi aplicada uma pressão de vácuo de ordem de 300 mmHG por 3h. Após este período, o dessecador foi preenchido com uma solução de hidróxido de cálcio saturada até a completa imersão das amostras e a pressão negativa foi mantida por mais uma hora. Após o desligamento da bomba de vácuo, para garantir a saturação dos concretos, os mesmos permaneceram imersos na solução por no mínimo 24h. A figura 15 apresenta diferentes etapas do processo de preparo dos corpos de prova.

Figura 15 – Preparo dos corpos de prova para ensaio de migração de cloretos



(fonte: elaborado pelo autor)

Ao final do ensaio de cloretos, que pode durar de 6h a 96h, as fatias de concreto foram fraturadas no sentido do fluxo de cloreto e uma solução de nitrato de prata foi aspergida na superfície fraturada. A figura 16 apresenta o ensaio em andamento. Devido à precipitação do nitrato sobre a superfície do concreto é possível determinar a leitura da região com alta concentração de cloretos, em função da variação da cor desta superfície, como pode ser observado na figura 17. Não é possível afirmar que a região sem alteração de cor é completamente livre de cloretos, pois a solução não reage com cloretos fixos e somente ocorre acima de uma determinada concentração de cloretos livres.

Figura 16 – Ensaio de migração de cloretos



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 17 – Nível de penetração de cloretos



(fonte: elaborado pelo autor)

A penetração média da frente de cloretos, em conjunto com outros fatores da execução do ensaio, como duração e voltagem aplicada, são utilizados na fórmula 2 para obtenção do coeficiente de migração.

$$D = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

D = Coeficiente de migração, em m^2/s ;

U = Voltagem aplicada, em V;

T = média da temperatura inicial e final do ensaio na solução anolítica, em $^{\circ}\text{C}$;

L = espessura da amostra, em mm;

x_d = valor médio de penetração de cloretos, em mm;

t = duração do ensaio, em h.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios descritos no Programa Experimental.

Para uma análise mais precisa da significância dos dados obtidos, foi realizado uma análise de variância (ANOVA) com 95% de confiabilidade, através do programa *Statistica* versão 10 (STATSOFT, 2010). A análise de variância dos resultados permite determinar com precisão quais das variáveis independentes estudadas (tempo de mistura, teor de aditivo) influenciaram diretamente nas propriedades mecânicas e de durabilidades dos concretos estudados.

6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados de resistência à compressão foram cedidos por Rosa (2013), que desenvolveu simultaneamente com esta pesquisa o seu programa experimental. Não é objetivo deste trabalho a análise das características mecânicas do concreto com ar incorporado, porém, devido à relevância da resistência à compressão axial como parâmetro de controle de qualidade do concreto, torna-se necessário a divulgação destes dados (tabela 8 e figura 18).

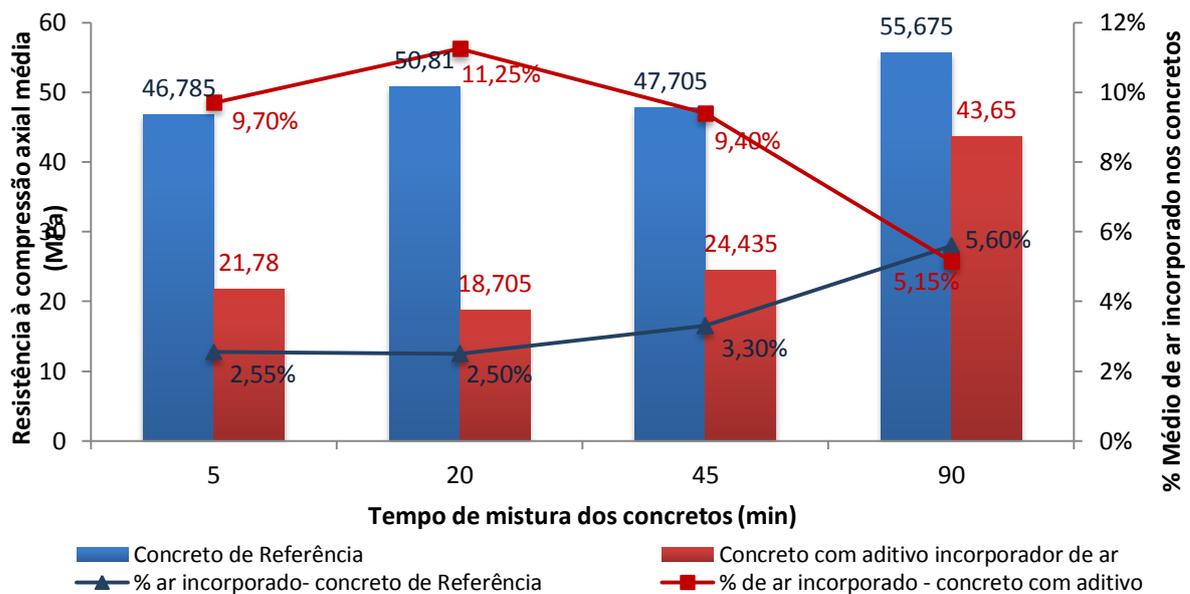
A figura 18 mostra que a variação do tempo de mistura para os concretos de referência (sem aditivo) não influenciou significativamente nos resultados de resistência à compressão axial dos concretos aos 28 dias. Ocorreu um pequeno aumento de resistência no tempo de mistura T4, possivelmente devido à perda de água ao ambiente devido ao longo tempo de mistura. Para os concretos com aditivo incorporador de ar, observou-se que, como esperado, a resistência à compressão axial foi inversamente proporcional ao teor de ar incorporado. A perda de ar incorporado observada no tempo de mistura T4 resultou em um grande aumento de resistência, quando comparado com tempos de mistura inferiores. Apesar dos concretos com ar incorporado e de referência apresentarem teores de ar incorporado semelhantes no tempo T4, a adição do aditivo resultou em uma queda de resistência de 22%.

Tabela 8 – Resultados de resistência à compressão axial e teor de ar incorporado

Ruptura compressão aos 28 dias					
Referência			Aditivo		
CP	MPa	Teor de ar incorporado (%)	CP	MPa	Teor de ar incorporado (%)
T1 - I	48,66	2,60	T1 - I	21,95	9,50
T1 - II	44,91	2,50	T1 - II	21,61	9,90
T2 - I	50,25	2,50	T2 - I	16,83	11,00
T2 - II	51,37	2,50	T2 - II	20,58	11,50
T3 - I	46,65	3,20	T3 - I	19,37	8,80
T3 - II	48,76	3,40	T3 - II	29,50	10,00
T4 - I	54,96	5,40	T4 - I	45,38	4,90
T4 - II	56,39	5,80	T4 - II	41,92	5,40

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 18 – Resultados médios de resistência à compressão axial e teor de ar incorporado



(fonte: elaborado pelo autor, baseado em ROSA, 2013)

6.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A tabela 9 e a figura 19 apresentam os resultados da absorção média de água absorvida para os diferentes tempos de ensaio.

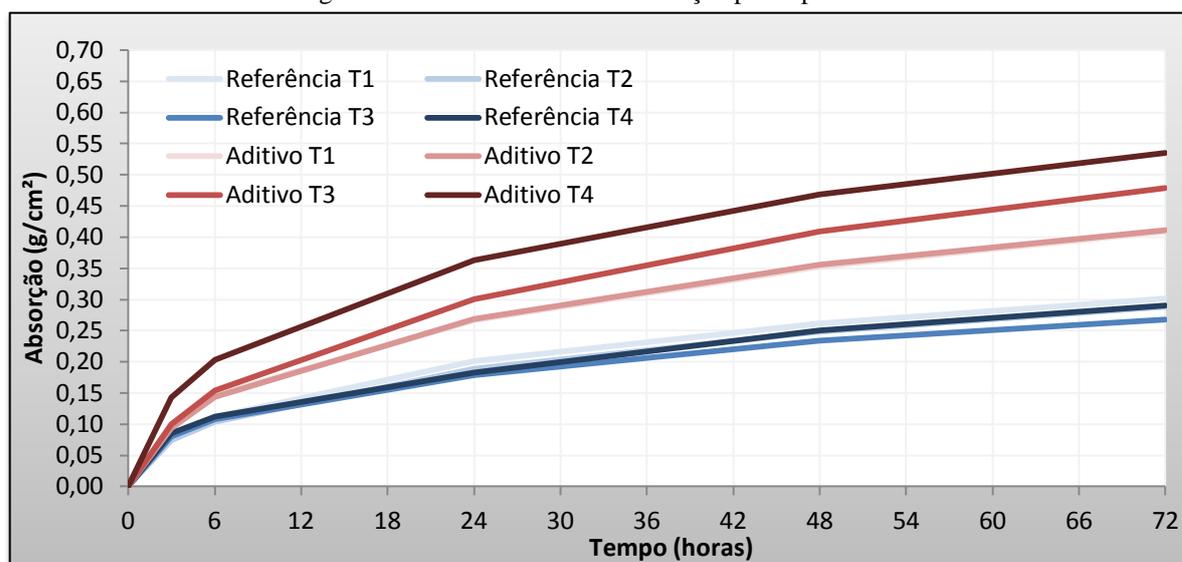
De acordo com os resultados expostos, pode-se observar que a variação da absorção de água em função dos tempos de mistura foi mais evidente para os concretos com aditivo. Para os concretos de referência, as variações também ocorreram, porém de forma mais amena.

Tabela 9 – Valores médios de absorção por capilaridade (g/cm²)

Amostra	0h	3h	6h	24h	48h	72h
Referência T1	0,000	0,080	0,112	0,201	0,261	0,302
Referência T2	0,000	0,074	0,104	0,189	0,248	0,289
Referência T3	0,000	0,080	0,108	0,179	0,234	0,268
Referência T4	0,000	0,085	0,112	0,183	0,251	0,291
Aditivo T1	0,000	0,097	0,147	0,267	0,353	0,409
Aditivo T2	0,000	0,094	0,143	0,269	0,356	0,411
Aditivo T3	0,000	0,100	0,154	0,301	0,409	0,479
Aditivo T4	0,000	0,143	0,203	0,363	0,468	0,535

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 19 – Valores médios de absorção por capilaridade



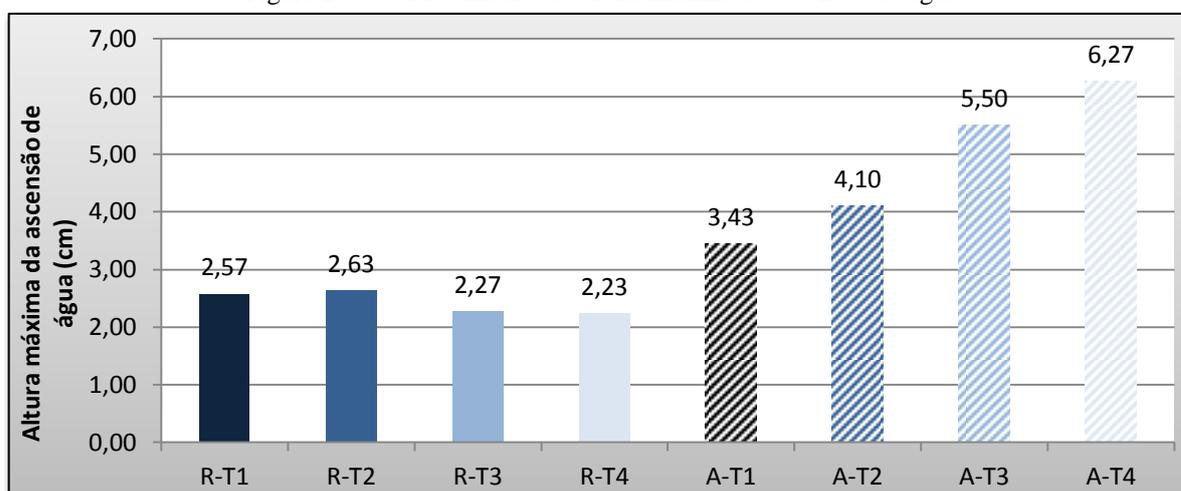
(fonte: elaborado pelo autor)

A incorporação de ar nos concretos ocasionou um aumento na taxa de absorção de água, e este efeito é intensificado em tempos de mistura superiores a 20 minutos. O concreto com ar incorporado com tempo de mistura de 5 minutos apresentou um aumento de 42% na absorção em relação à média obtida no concreto de referência em diferentes tempos, enquanto com 90 minutos de mistura este aumento chegou a 86%.

A redução de ar incorporado no concreto para o tempo de mistura T4 (90 min), não resultou em um efeito positivo na absorção capilar. Apesar de apresentar as menores quantidade de ar incorporado e a maior resistência mecânica, estas amostras obtiveram o pior desempenho. Como os efeitos de capilaridade estão intimamente ligados com a dimensão dos capilares, este resultado pode ser consequência da alteração do sistema de poros, resultando em uma maior sucção capilar mesmo em uma menor porosidade.

A figura 20 apresenta os valores médios da altura máxima de ascensão de água observada durante o ensaio. Como esperado, esta característica segue uma tendência similar à quantidade de água absorvida. O traço de referência obteve um melhor desempenho e o aumento do tempo de mistura foi mais prejudicial para os concretos com ar incorporado.

Figura 20 – Valores médios da altura máxima de ascensão de água

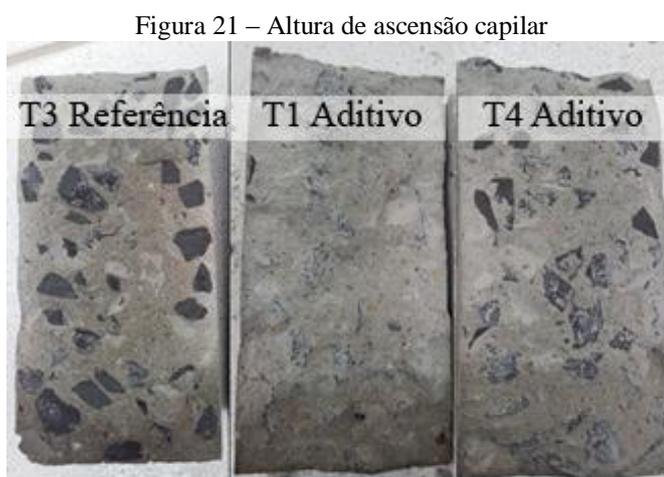


(fonte: elaborado pelo autor)

Durante a análise visual, foi possível observar que o interior dos corpos de prova dos concretos de referência apresentava uma leve variação de tonalidade (indicativa da presença de umidade), apesar do processo de secagem ter sido realizado de acordo com o padrão normativo e respeitando os limites de constância de massa. Esta situação não foi observada

para os concretos com ar incorporado, que apresentaram uma tonalidade mais uniforme e uma nítida altura horizontal de ascensão de água.

A figura 21 apresenta três corpos de prova após o rompimento, para análise da ascensão de água. O primeiro corpo de prova, à esquerda, é um exemplar do concreto de referência com tempo de mistura de 45 minutos, enquanto os outros dois corpos de prova são exemplares de concretos com ar incorporado, no centro com tempo de mistura de 5 minutos e na direita com tempo de mistura de 90 minutos.



(fonte: elaborado pelo autor)

Para uma análise mais precisa da significância das variáveis independentes consideradas no ensaio de absorção, foi realizado um tratamento estatístico dos resultados com o auxílio do Programa Statistica. A análise de variância (tabela 10) foi gerada com os resultados de água absorvida por capilaridade após 72h (final do ensaio), com um nível de significância de 95%.

Tabela 10 – Análise de variância para absorção por capilaridade em 72h

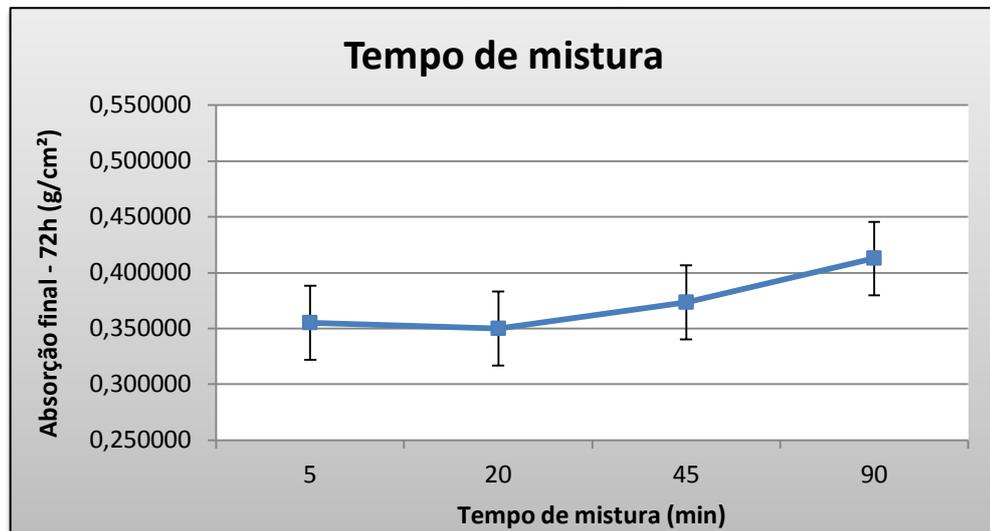
Fonte	SQ	GDL	MQ	Valor de F	Valor de P	Efeito
Tempo de Mistura (min) (1)	0,014	3	0,005	3,3	0,047	Significativo
Utilização de Aditivo (2)	0,176	1	0,176	120,8	0,000	Significativo
(1) x (2)	0,020	3	0,007	4,6	0,016	Significativo

(fonte: elaborado pelo autor)

Foi constatado que todas as variáveis independentes apresentam um efeito significativo na absorção por capilaridade do concreto. As figuras 22 a 24 mostram graficamente as tendências de comportamentos observadas.

A figura 22 mostra que existe uma tendência de aumento da absorção de água com o aumento do tempo de mistura. Para tempos de mistura superiores a 20 minutos, estas variações passam a ser mais intensas.

Figura 22 – Efeito do tempo de mistura para absorção final

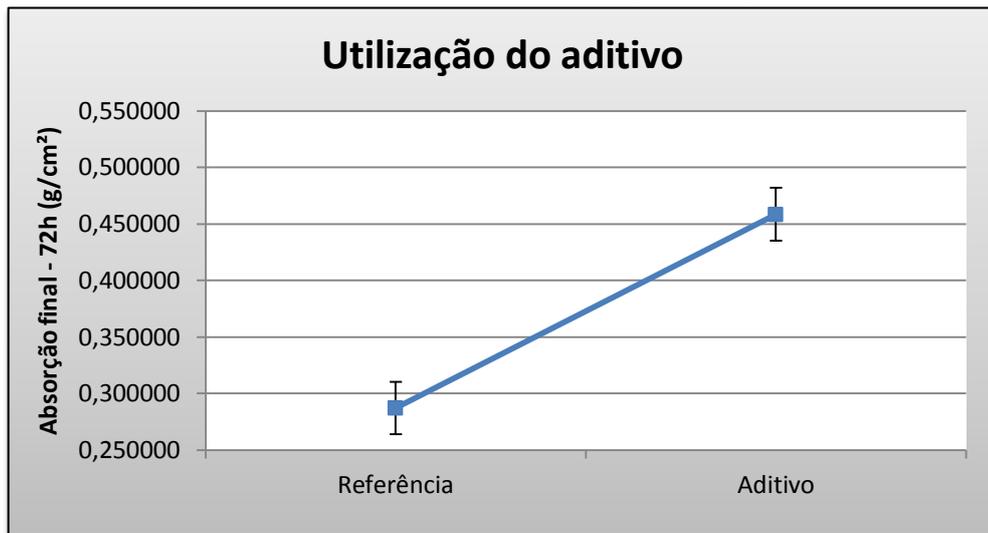


(fonte: elaborado pelo autor)

Houve uma pequena queda de 1,5% na absorção final entre os tempos de mistura iguais a 5 e 20 minutos, seguidos de aumentos de 6,6% e 10,5% nos tempos de mistura de 45 minutos e 90 minutos, respectivamente. Houve um aumento de 16,1% entre as medições finais e iniciais.

Para os concretos estudados, foi verificado que existe uma tendência de aumento da absorção de água com a incorporação do aditivo nas misturas. De acordo com a figura 23, observa-se que a variação de resultados dos concretos de referência em relação aos concretos com aditivos foi de 59,6%.

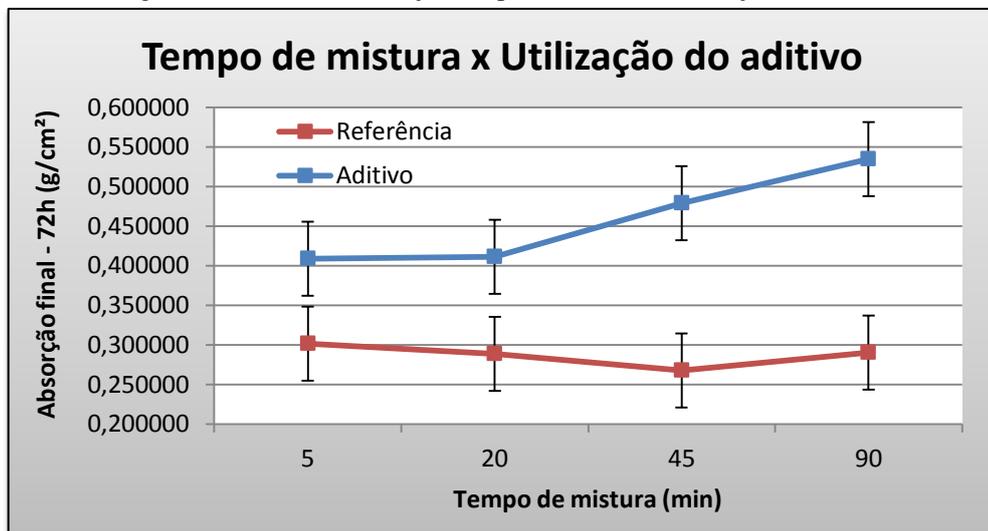
Figura 23 – Efeito da utilização do aditivo para absorção final



(fonte: elaborado pelo autor)

O efeito da interação dos fatores “tempo de mistura e uso de aditivo” (figura 24), mostra que para os concretos com aditivo, a variação do tempo de mistura implica diretamente em um aumento da absorção de água. No entanto, para os concretos de referência (sem aditivo) esta tendência não é clara.

Figura 24 – Efeito da interação tempo de mistura x utilização do aditivo



(fonte: elaborado pelo autor)

Em função destes resultados, foram realizadas novas análises de variância individuais levando em consideração o efeito do tempo de mistura na absorção de água para os concretos de referência e para os concretos com aditivo incorporador de ar (tabelas 11 e 12)

Tabela 11 – Análise de variância para absorção final – Concretos de referência

Fonte	SQ	GDL	MQ	Valor de F	Valor de P	Efeito
Tempo de Mistura (min)	0,002	3	0,00061	1,7	0,242	Não Significativo

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 12 – Análise de variância para absorção final – Concretos com aditivo

Fonte	SQ	GDL	MQ	Valor de F	Valor de P	Efeito
Tempo de Mistura (min)	0,033	3	0,010928	4,3	0,044	Significativo

(fonte: elaborado pelo autor)

Como esperado, para os concretos de referência, o tempo de mistura não apresentou um efeito significativo. Ou seja, não interferiu na variável de resposta (absorção dos concretos). O oposto foi observado para os concretos com ar incorporado, nos quais o tempo de mistura apresentou um efeito significativo.

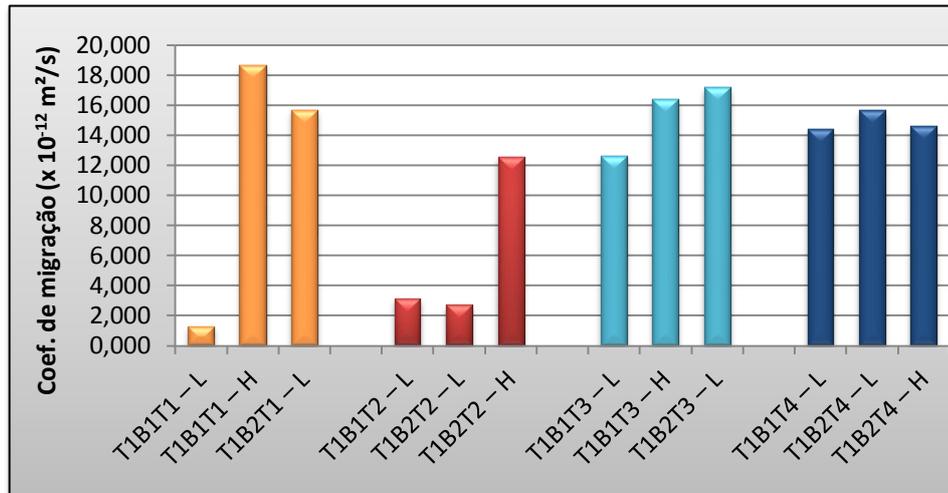
6.3 MIGRAÇÃO DE CLORETOS

Devido a uma falha do equipamento durante a realização dos ensaios, uma parte dos resultados foi comprometida. Duas das três amostras do concreto de referência, analisadas para o tempo de mistura T2 (20 min), foram perdidas. A partir deste incidente, foi determinado que os ensaios de migração de cloretos fossem realizados com quatro amostras e não mais com três amostras, como inicialmente planejado.

As figuras 25 e 26 apresentam os resultados do ensaio de migração de cloretos dos traços de referência e com aditivo incorporador de ar, respectivamente.

Pela análise gráfica da figura 25 é possível observar que não é possível analisar de forma clara o efeito dos diferentes tempos de mistura na migração de cloretos.

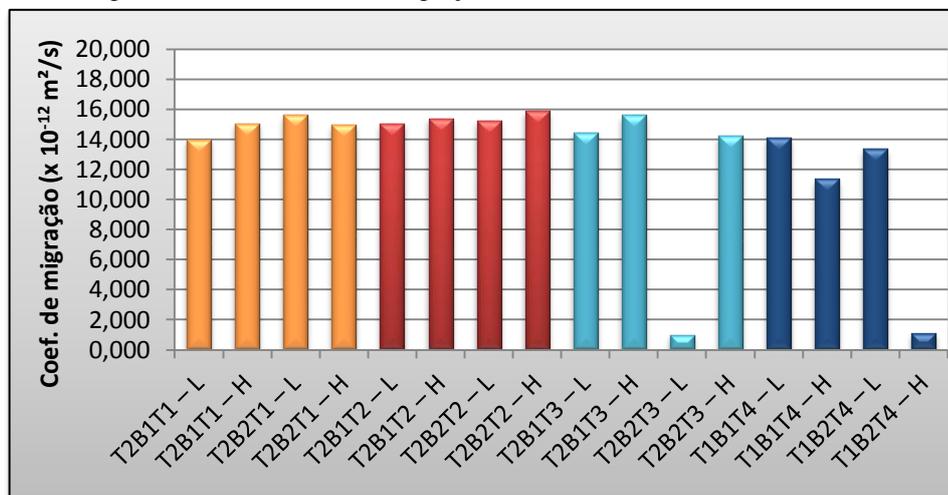
Figura 25 – Coeficientes de migração de cloretos – Concretos de referência



(fonte: elaborado pelo autor)

Pela análise gráfica da figura 26 é possível observar apenas uma leve tendência à diminuição do coeficiente de migração com o tempo de mistura T4, sem significativas variações nos tempos de mistura restantes.

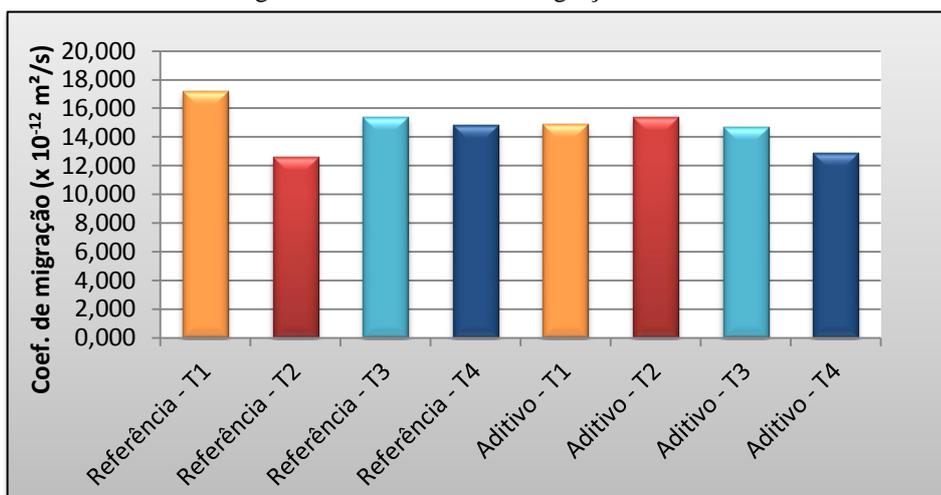
Figura 26 – Coeficientes de migração de cloretos – Concretos com aditivo



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 27 apresenta o coeficiente de migração médio para cada tempo de mistura analisado, excluídos os dados comprometidos já mencionados.

Figura 27 – Coeficiente de migração – Médias



(fonte: elaborado pelo autor)

Pela análise gráfica (figura 27) observa-se que não ocorreram grandes variações de resultados com a adição de ar incorporado nos concretos. Tanto os corpos de prova de referência como os com aditivo, obtiveram resultados semelhantes. O tempo de mistura T2 do concreto de referência apresentou um pequeno aumento de desempenho, mas isto é provavelmente resultado da exclusão de duas amostras deste traço. A amostra remanescente possui um coeficiente de migração menor do que a média, mas ainda dentro da faixa de variação apresentada pelas outras amostras. O concreto com aditivo apresentou um leve aumento de desempenho no tempo de mistura T4, o que pode indicar que uma menor quantidade de ar incorporado possivelmente resultaria em um aumento de desempenho.

Objetivando verificar a existência de uma influência significativa do tempo de mistura e do teor de aditivo na migração de cloretos foi realizada uma análise de variância. Em função de este tratamento estatístico necessitar de conjuntos de dados de mesma dimensão, neste caso com três valores, os valores de migração de cloretos perdidos por falha do equipamento (mistura de referência) foram substituídos pelos resultados médios dos corpos de prova analisados.

No caso do tempo T2 (20 min) para os concretos de referência, a alternativa de replicar a média dos resultados, significaria a replicação múltipla de um valor, que aparentemente parecia estar no limite inferior da variância aceitável para o ensaio. Esta tomada de decisão foi um fator limitante deste ensaio. No caso dos tempos de mistura com mais de três resultados de migração de cloretos, foi excluído o valor que apresentou o maior desvio em relação à média.

A tabela 13 apresenta os resultados da análise de variância, representados e as figuras 26 a 28 mostram as tendências de comportamentos dos concretos.

Pela análise de variância dos resultados (tabela 13) observa-se que nenhuma variável independente apresentou significância na migração de cloretos.

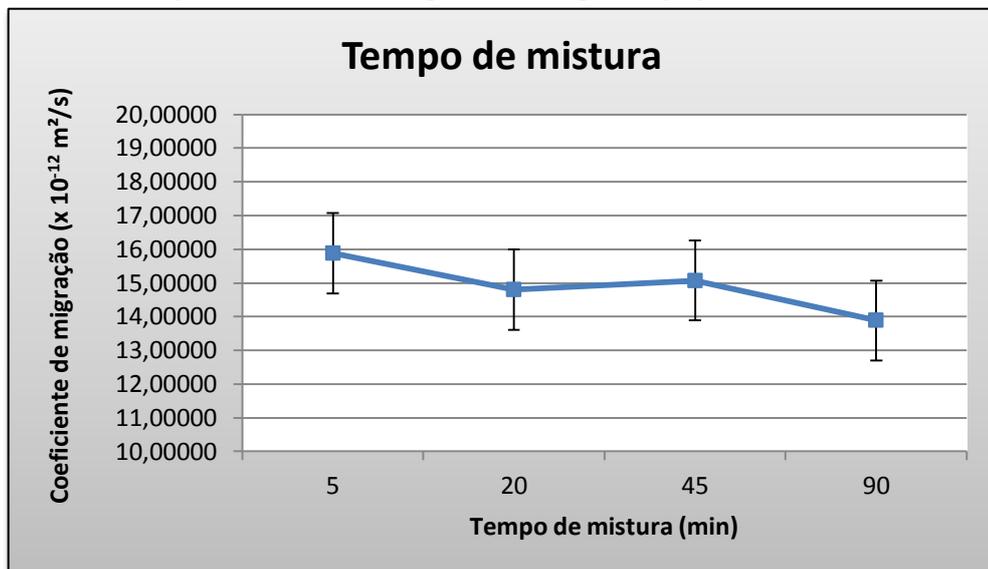
Tabela 13 – Análise de variância para migração de cloretos

Fonte	SQ	GDL	MQ	Valor de F	Valor de P	Efeito
Tempo de Mistura (min) (1)	12,180	3	4,060089	2,2	0,134	Não Significativo
Utilização de Aditivo (2)	3,623	1	3,622589	1,9	0,185	Não Significativo
(1) X (2)	6,422	3	2,140786	1,1	0,365	Não Significativo

(fonte: elaborado pelo autor)

De acordo com a figura 28 não é possível observar de forma clara uma tendência de comportamento dos concretos na migração de cloretos frente à variação do tempo de mistura.

Figura 28 – Efeito do tempo de mistura para migração de cloretos

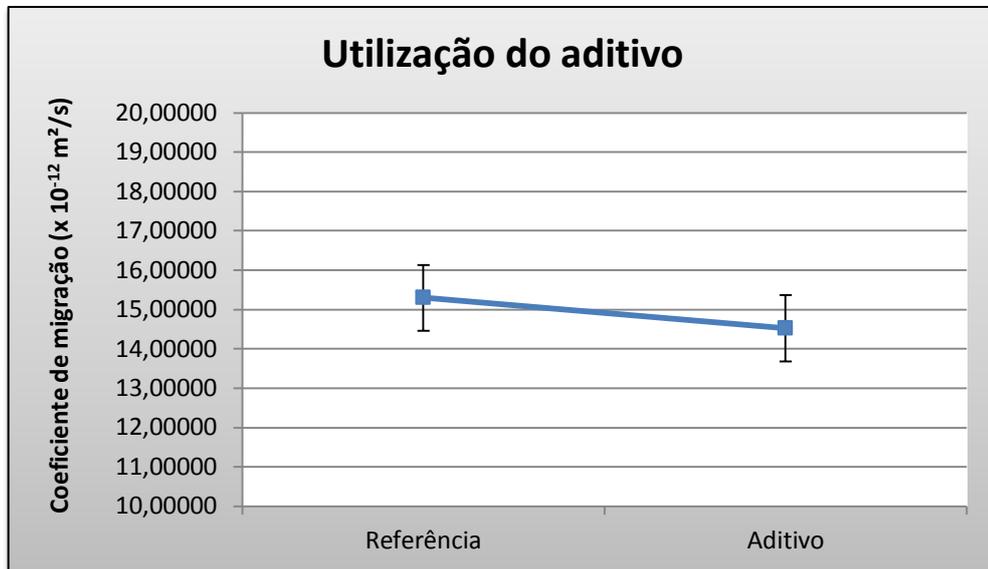


(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 29 mostra que a variação de resultados de migração de cloretos dos concretos de referência para os concretos com aditivo foi de 5,1%. Conforme já demonstrado pela análise de variância (tabela 13), o uso ou não uso do aditivo incorporador de ar não apresentou significância, indicando que os resultados de migração de cloretos para os concretos

estudados não foram afetados nem pelo tempo de mistura e nem pelo uso ou não uso de aditivo.

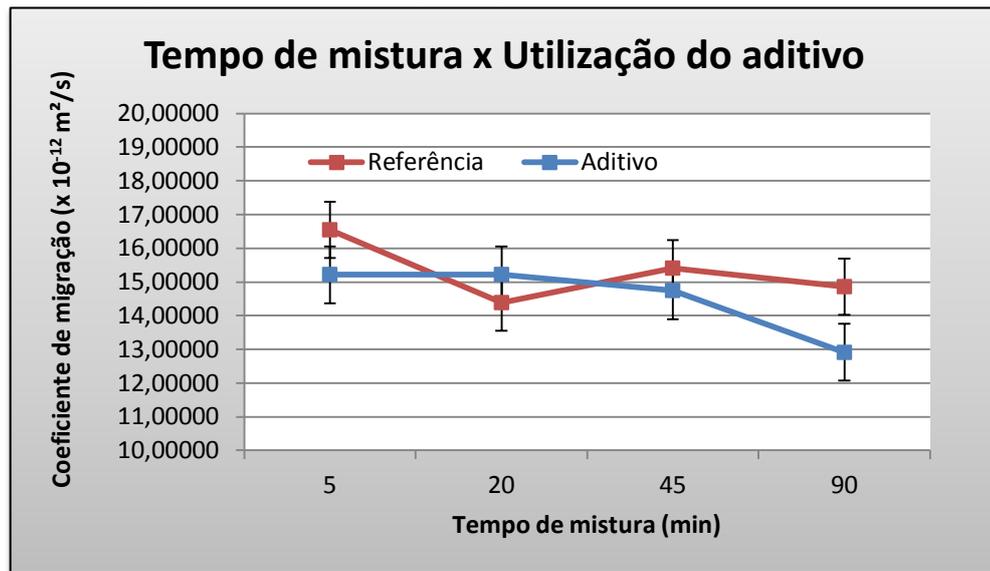
Figura 29 – Efeito da utilização do aditivo para migração de cloretos



(fonte: elaborado pelo autor)

O gráfico da figura 30 mostra que para os concretos com aditivo a variação do tempo de mistura tende a reduzir a migração de íons cloreto para tempos superiores a 20min. A variação do tempo de 5 min para 20 min parece não alterar o patamar de resultados. Para os concretos de referência não é possível verificar uma tendência geral de comportamento, em função dos resultados do tempo de mistura T2 (20 min) ter sido prejudicado pela perda de dados em função de falha no equipamento de ensaio. Para tempos de misturas superiores a 45 min, ocorre uma redução da migração de cloretos.

Figura 30 – Efeito da interação tempo de mistura x utilização do aditivo



(fonte: elaborado pelo autor)

Em função do exposto, foi realizada uma análise de variância individual para os resultados de migração de cloretos, tanto para os concretos de referência quanto para os concretos com aditivo. Os resultados destas análises são apresentados nas tabelas 14 e 15.

Tabela 14 – Análise de variância para migração de cloretos – Concretos de referência

Fonte	SQ	GDL	MQ	Valor de F	Valor de P	Efeito
Tempo de Mistura (min)	0,002	3	0,000615	1,7	0,242	Não Significativo

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 15 – Análise de variância para migração de cloretos – Concretos com aditivo

Fonte	SQ	GDL	MQ	Valor de F	Valor de P	Efeito
Tempo de Mistura (min)	10,837	3	3,612194	5,3	0,026	Significativo

(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados das análises de variância mostraram um efeito significativo do tempo de mistura apenas para o traço com aditivo incorporador de ar.

Os resultados obtidos neste ensaio foram o oposto do observado no ensaio de absorção de água por capilaridade, uma vez que o tempo de mistura influenciou positivamente no coeficiente de migração de cloretos. Associa-se estes resultados, possivelmente ao menor

conteúdo de ar incorporado nestas amostras. A redução da migração de cloretos foi coerente com o aumento de resistência observado no tempo T4 (90min) por Rosa (2013).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de analisar a durabilidade de concretos com aditivos incorporadores de ar, assim como o efeito do tempo de mistura nestas propriedades do material, foram realizados ensaios de absorção por capilaridade e de migração de cloretos em concretos confeccionados com relação $a/c=0,48$ e com tempos de mistura de 5 minutos, 20 minutos, 45 minutos e 90 minutos. Em alguns concretos foi utilizado um teor de aditivo igual a 0,15% em relação à massa de cimento, o que resultou em teores de ar incorporado na faixa de 9 a 11%. Os resultados dos concretos de referência e dos concretos com aditivo incorporador de ar foram analisados estatisticamente para a verificação da influência das variáveis independentes nos parâmetros estudados.

As conclusões apresentadas não devem ser tomadas de maneira absoluta, pois é produto de um trabalho de escopo reduzido, com técnicas, materiais e quantidades específicos. São necessárias novas pesquisas com resultados que possam complementar ou confirmar os resultados obtidos neste trabalho e sustentar as afirmações expostas a seguir.

7.1 CONCLUSÕES

Com base nos ensaios realizados, foi possível enumerar as seguintes conclusões:

- a) a utilização de aditivos incorporadores de ar, nas condições aqui testadas, resulta em um grande aumento na trabalhabilidade do concreto. O abatimento de tronco de cone duplicou (80mm para 160mm) após sua aplicação;
- b) tempos de mistura excessivos acarretam na perda de ar incorporado ao concreto. Foi observada uma redução na ordem de 2% e 6% na quantidade de ar incorporado aos 45 e 90 minutos, respectivamente;
- c) a incorporação de ar influenciou negativamente na absorção por capilaridade do concreto. Os corpos de prova com ar incorporado apresentaram valores de absorção aproximadamente 40% superiores aos corpos de prova de concreto convencional;
- d) a altura máxima de absorção por capilaridade apresentou o mesmo comportamento da absorção capilar. Ou seja, os concretos com ar incorporado apresentaram maiores alturas de absorção e o tempo de mistura teve efeito negativo nestes concretos;

- e) tempos de mistura maiores do que 20 min tiveram efeitos negativos nas absorções dos concretos com ar incorporado. Concretos com tempo de mistura de 90 min apresentaram um aumento de 30% no sua absorção capilar em relação à tempos de mistura de 5 minutos;
- f) a incorporação de ar nos concretos não teve efeito no coeficiente de migração de cloretos. Os corpos de prova com aditivos incorporadores de ar apresentaram desempenho semelhante aos corpos de prova de referência;
- g) o tempo de mistura teve um leve efeito positivo no coeficiente de migração de cloretos do concreto com ar incorporado. Não houve alteração significativa no coeficiente com o aumento do tempo de mistura de 5 para 20 minutos, porém foi observada uma redução de 3% para os concretos com tempo de mistura de 45 min e de 15% para concretos com tempo de mistura de 90 minutos, quando comparados com os tempos iniciais;
- h) o tempo de mistura não afetou a absorção por capilaridade e o coeficiente de migração de cloretos do concreto convencional (referência).

7.2 SUGESTÕES

Tendo em vista a pequena quantidade de trabalhos realizados com a incorporação de ar no concreto, são muitas as possíveis sugestões para pesquisas futuras neste tema. Algumas delas foram selecionadas a seguir:

- a) verificar o desempenho de diferentes de teores de ar incorporado;
- b) avaliar o desempenho da incorporação de ar em concretos com diferentes consumos de cimento;
- c) analisar o comportamento do concreto com ar incorporado em diferentes testes de durabilidade, como ensaios de carbonatação e ataques por sulfatos;
- d) comparar o desempenho do concreto com ar incorporado com concretos convencionais de mesma trabalhabilidade;
- e) analisar o efeito da vibração na retenção do ar incorporado no concreto em estado fresco.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 201.2R**: Guide to Durable Concrete. Farmington Hills, USA, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202**: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. West Conshohocken, USA, 2012.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**. v. 23, n. 3, p. 724-742, Amsterdam, May 1993.

ANDRADE, J. J. de O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras**: Iniciação por cloretos. 2001. 256 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ANDRADE, T. Tópicos Sobre Durabilidade do Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto**: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005. p. 753-792.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 47**: concreto – determinação do teor de ar em concreto fresco – método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739**: concreto – ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7211**: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7222**: concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 9779**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D. J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 15, n. 2, p. 93-103, Apr. 2001.

BORDALLO, H. N.; ALDRIDGE, L. P.; WUTTKE, J.; FERNANDO, K.; BERTRAM, W. K.; PARDO, L. C. Cracks and Pores: Their roles in the transmission of water confined in cementitious materials. **The European Physical Journal: Special Topics**, Berlin, v. 189, n. 1, Oct. 2010

BRENNAND CIMENTOS. **Certificado de ensaios em cimento**. CP V-ARI MAX. Sete Lagoas, MG, jul. 2013.

CELIK, K.; JACKSON, M. D.; MANCIO, M.; MERAL, C.; EMWAS, A. -H.; MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for portland cement in self-compacting and sustainable concrete. **Cement and Concrete Composites**, Amsterdam, v. 45, n. 1, p. 136-147, Jan. 2014.

DRANSFIELD, J. Admixtures for concrete, mortar and grout. In: NEWMAN, J.; CHOO, B. S. (Ed.) **Advanced Concrete Technology**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003, v. 3, p. 3-36.

EDMEADES, R. M.; HEWLETT, P. C. Cement Admixtures. In: HEWLETT, P. C. (Ed.) **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003, p. 841-905.

ELSEN, J.; LENS, N.; VYNCKE, J., AARRE, T.; QUENARD, D.; SMOLEJ, V. Quality assurance and quality control of air entrained concrete. **Cement and Concrete Research**, Amsterdam, v. 24, n. 7, p. 1267-1276, 1994

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 206-1: Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity**. Brussels, 2000.

FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005. p. 829-855.

ISAIA, G. C. A Evolução do Concreto Estrutural. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 1-55.

ISMAIL, I.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; NICOLAS, R. S.; BRICE, D. G.; KILCULLEN, A. R.; HAMDAN, S.; DEVENTER, J. S. J. van. Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 48, n. 1, p. 1187-1201, Nov. 2013.

KHEDR, S. A.; ABOU-ZEID, M. N.; ABADIR, J. M. Response of Air-Entrained Concrete to Severe Chemical Aggression. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, USA, v. 18, n. 1, Jan.-Feb. 2006.

LIMA, M. G. de. Ação do Meio Ambiente sobre as Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005. p. 712-751.

MEDEIROS, M. H. F. de. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. 2008. 140 f. Tese (Doutor em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MEDEIROS, M. H. F. de; ANDRADE, J. J. de O.; HELENE, P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 773-808.

MEDEIROS, M. H. F. de; HOPPE FILHO, J.; HELENE, P. Influence of the slice position on chloride migration tests for concrete in marine conditions. **Marine Structures**, Amsterdam, v. 22, n. 2, p. 128-141, Apr. 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008.

MURPHY, M. L. de; LISSENDEN, C.; XIAO, C. **Technology Evaluation on Characterization of the Air Void System in Concrete**. Harrisburg, USA: Thomas D. Larson Pennsylvania Transportation Institute, Sept. 2009. Final Report. n. FHWA-PA-2009-013-PSU 020.

NEPOMUCENO, A. A. Mecanismo de Transporte de Fluidos no Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005. p. 793-827.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. rev. atual. São Paulo: Pini, 1997.

NORDTEST. **NT Build 492: Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments**. Espoo, Finland, 1999,

PAULON, V. A. A Microestrutura do Concreto Convencional. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005. p. 583-604.

RASHED, A. I.; WILLIAMSON, R. B. Microstructure of entrained air voids in concrete, part II. **Materials Research Society**, Warrendale, USA, v. 6, n. 11, p. 2474-2483, Nov. 1991.

ROSA, P. **Concreto com ar incorporado: variação das propriedades mecânicas em função do tempo de mistura dos materiais**. 2013. 82 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ROY, D. M.; IDORN, G. M. **Concrete Microstructure**. Washington, USA: Strategic Highway Research Program, Aug. 1993. Report n. SHRP-C-340

STATSOFT Statistica 10: numerical analysis software. Tulsa, US: StatSoft Inc., 2010.

SHI, C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 3, p. 537-545, Mar. 2004.

TORRES, A. da S. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta-análise**. 2011. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

WONG, H. S.; PAPPAS, A. M.; ZIMMERMAN, R. W.; BUENFELD, N. R. Effects of entrained air voids on the microstructure and mass transport properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, Amsterdam, v. 41, n. 10, p. 1067-1077, Oct. 2011.