



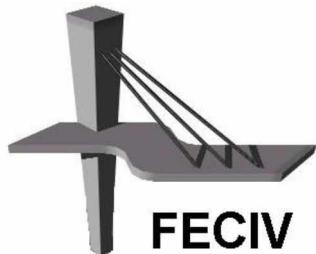
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DEFESA DE MESTRADO

**ANÁLISE DA DURABILIDADE DO CONCRETO  
COM AR INCORPORADO PARA USO EM  
PAREDES ESTRUTURAIS**

LORENA COSTA CAMPOS

UBERLÂNDIA, 10 de fevereiro de 2017



**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



**Lorena Costa Campos**

**ANÁLISE DA DURABILIDADE DO CONCRETO COM AR  
INCORPORADO PARA USO EM PAREDES  
ESTRUTURAIS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

**Orientador: Prof. Dr. Turibio Jose da Silva**

Uberlândia, 10 de fevereiro de 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

C198a Campos, Lorena Costa, 1990-  
2018 Análise da durabilidade do concreto com ar incorporado para uso em  
paredes estruturais [recurso eletrônico] / Lorena Costa Campos. - 2018.

Orientador: Turibio José da Silva.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1215>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. 2. Construção de concreto - Uberlândia. 3.  
Concreto - Aditivos. I. Silva, Turibio José da (Orient.) II. Universidade  
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil. III. Título.

---

CDU: 624

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262



## ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

ATA Nº: 176/2016

**CANDIDATO:** Lorena Costa Campos

**Nº. Matrícula:** 11412ECV008

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Turíbio José da Silva

**TÍTULO:** "Análise da durabilidade do concreto com ar incorporado para uso em paredes estruturais"

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** Estruturas e Construção Civil

**LINHA DE PESQUISA:** Construção Civil

**PROJETO DE PESQUISA:** Comportamento Estrutural

**DATA DA DEFESA:** 10 de fevereiro de 2017

**LOCAL:** Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y.

**HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO:** 9:02 - 11:12

Reuniu-se na **Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGEC, assim composta: Professores Doutores: **Paulo Roberto do Lago Helene – PhD Engenharia, Leila Aparecida de Castro Motta**, coorientadora e **Prof. Dr. Turíbio José da Silva** orientador da candidata. Ressalta-se que todos os membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. Turíbio José da Silva** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu à discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou a candidata APROVADA. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Professor Orientador: **Prof. Dr. Turíbio José da Silva – FECIV/UFU**

Professora Coorientadora: **Prof.ª Dr.ª Leila Aparecida de Castro Motta – FECIV/UFU**

Membro externo: **Dr. Paulo Roberto do Lago Helene – PhD Engenharia**

Uberlândia, 10 de FEVEREIRO de 2017

*À minha avó Celina Pereira Borges, por este período de luta contra o câncer  
Aos meus familiares, amigos, e ao meu orientador pelo apoio*

# AGRADECIMENTOS

---

Ao meu marido, Jessé Faria Silveira, que esteve ao meu lado em todos os momentos, não me deixando desistir. Pela sua compreensão, paciência, extremo companheirismo e dedicação para comigo.

Ao meu pai, Fernando Luzia Campos, minha mãe Elba Costa Campos e minha irmã, Laís Costa Campos, que sempre ajudaram mais do que puderam se dar conta.

À minha coach, que me fez ver saídas onde eu não via mais solução.

Ao meu orientador pela sua paciência e orientações cruciais.

Aos meus colegas de mestrado que foram presentes de Deus, tornando tudo mais leve mesmo nas madrugadas em claro.

Aos meus amigos que amorosamente me impulsionaram a continuar.

Aos meus alunos que me fizeram descobrir a gratificante arte de lecionar.

À Cristiane Pires, Rafael Machado, e Wanderly Geraldo da Silva pelo companheirismo e ideias cruciais para a busca de solução de problemas durante este trabalho.

À Gercindo Ferreira pela disponibilidade e solicitude em relação à esta pesquisa.

À Maria Cláudia Salomão, pelo envio de material de base para compreensão do equipamento por ela desenvolvido.

À Gicelle de Souza, responsável pelo planejamento, orçamento e controle da empresa Marca Registrada, pela sua prontidão e disposição em ajudar.

À Francisco Custódio Pereira Filho, pelo auxílio com peças para a execução deste trabalho.

Às empresas Brasmix, El Global e PDCA Engenharia pelo fornecimento de material necessário para a realização deste estudo.

À FAPEMIG e à FAU pelo suporte financeiro a este projeto.

A todos aqueles que, diretamente ou indiretamente contribuíram para a conclusão desta dissertação.

Campos, L. C. Análise da durabilidade do concreto com ar incorporado para uso em paredes estruturais. 100 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

## RESUMO

---

O objetivo deste trabalho é apresentar a análise de alguns parâmetros de desempenho relativos à durabilidade de paredes de concreto, que constituem um sistema de vedações verticais comumente utilizado em residências, introduzindo o aditivo incorporador de ar no concreto. Para tanto, várias características do concreto foram avaliadas mediante a variação do teor de ar incorporado. Foram utilizados ensaios acelerados relacionados à vida útil, como o ensaio de carbonatação acelerada e ataque ácido, e ensaios de avaliação de desempenho de estruturas em uso, tais como os ensaios de estanqueidade, feitos em sistemas de vedação verticais. Além destes, também foram verificadas a resistência à compressão e absorção por capilaridade e fervura em corpos de prova. Os ensaios de avaliação de desempenho foram realizados em protótipos feitos em dimensões similares às reais utilizando-se 3 teores de aditivo, permitindo reproduzir as condições de execução deste sistema em obra. Foram avaliados os concretos com 0,0%, 0,5% e 1,0% de aditivo incorporador de ar e para esses parâmetros, o teor que sofreu maior perda de massa devido ao ataque ácido e obteve maior profundidade de carbonatação foi o teor de 0,5% de aditivo. Para o teor de 1,0% os resultados mostraram a tendência de diminuição da conexão dos poros da pasta em comparação ao teor de 0,5%, pois obteve-se uma maior resistência ao ataque ácido e à carbonatação, mesmo com uma grande variabilidade de resultados. Os resultados de absorção por capilaridade convergiam para uma mesma média de resultados de acordo com o tipo de cura. Assim, neste estudo a durabilidade da estrutura não foi afetada mediante o incremento de ar incorporado.

**Palavras-chave:** Paredes de concreto – Ar incorporado - Durabilidade – Carbonatação – Permeabilidade – Ataque ácido

Campos, L. C. Durability analysis of structural walls with air entrainment concrete. 100 pp.  
MSc Dissertation, Faculty of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2017.

## ABSTRACT

---

The objective of this work is to present a study of durability of concrete walls, using air entraining admixture, under weather actions, on systems commonly used to house's construction. To achieve this goal, several specific characteristics will be evaluated by the variation of the entrapped air content in the concrete. Service life prediction will be considered through accelerated tests such as the accelerated carbonation test and acid attack. Furthermore, evaluation tests of performance in structures such as testing permeability, made in vertical sealing systems will be done. In addition, compressive strength and water absorption by capillarity will also be checked for the test specimens. For tests performed in the vertical sealing will be used prototypes made in similar dimensions, which reproduce the real conditions of this system. Concretes with 0,0%, 0,5% and 1,0% air entraining admixture contends were evaluated and the 0,5% contend has showed the deepest carbonation and greater weight loss due to acid attack. For the 1,0% contend the results showed a tendency of decreasing pore connection compared to the 0,5% contend, as it obtained a greater resistance to the acid attack and the carbonation, even with a great variability. The results of capillary absorption converged to the same average results according to the type of cure. Thus, in this study the durability of the structure was not affected by the increase of air entrained contend.

**Keywords:** Durability – Carbonation – Permeability – Acid attack

# SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

---

## SÍMBOLOS

$d_h$	-Deslocamento horizontal instantâneo
$d_{hr}$	-Deslocamento horizontal residual
$k$	- Coeficiente de permeabilidade
$k_g$	-Coeficiente de permeabilidade aos gases
$F$	-Fluxo de massa (ou água)

## ABREVIATURAS

<i>ABNT</i>	-Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>ABCP</i>	-Associação Brasileira de Cimento Portland
<i>CEF</i>	-Caixa Econômica Federal

## SIGLAS

<i>PMCMV</i>	-Programa Minha Casa Minha Vida
<i>SVVIE</i>	-Sistemas de vedação vertical interno e externo
<i>VU</i>	- Vida útil
<i>VUP</i>	-Vida útil de projeto

# LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1 – Execução de armação do sistema paredes de concreto armado – Res. Pequis ..	15
Figura 2 – Construção em alvenaria estrutural com blocos de concreto .....	20
Figura 3 – içamento de elementos pré-fabricados em canteiro .....	21
Figura 4 – Sistema construtivo steel frame .....	22
Figura 5 – Casa construída em painéis de madeira transformada .....	23
Figura 6 – Moradias de interesse social construídas com paredes de concreto – Residencial Pequis .....	24
Figura 7 – Armaduras verticais de paredes com dimensão de 10cm.....	26
Figura 8 – Estrutura típica de um aditivo tensoativo incorporador de ar .....	29
Figura 9 – Estrutura típica de um tensoativo incorporador de ar na pasta de cimento.....	30
Figura 10 – Desempenho de uma edificação ao longo do tempo .....	38
Figura 11 – Condições de exposição ao vento conforme as regiões brasileiras.....	41
Figura 12 – Profundidade de carbonatação .....	47
Figura 13 – Formação de sais solúveis e insolúveis no concreto .....	52
Figura 14 – Visão 3D dos protótipos.....	61
Figura 15 – Radiers dos quatro protótipos .....	62
Figura 16 – Formas metálicas.....	62
Figura 17 – Faquetas de aço carbono para travamento transversal de formas .....	62
Figura 18 – Concretagem dos protótipos (a) e protótipos finalizados (b) .....	63
Figura 19 – Esquema da câmara de carbonatação .....	64
Figura 20 – Câmara de carbonatação – Universidade Federal de Uberlândia.....	64
Figura 21 – Variação da temperatura em °C para os 45 primeiros dias de ensaio .....	65
Figura 22 – Variação de Umidade (%) para os primeiros 45 dias de ensaio.....	66
Figura 23 – Profundidade de carbonatação (mm) em relação ao tempo de secagem .....	67
Figura 24 – Metodologia de definição de profundidade de carbonatação.....	68
Figura 25 – Marcação e corte dos corpos de prova .....	69
Figura 26 – Corpos de prova parcialmente (a) e completamente imersos (b) em solução ácida.....	69
Figura 27 – Esquema de dispositivos para ensaio de estanqueidade – Vista Frontal .....	70
Figura 28 – Montagem do aparelho para ensaio de estanqueidade .....	71

Figura 29 – Área de ensaio com estuque (a) e com estuque e textura (b) .....	72
Figura 30 – Ensaio de absorção por capilaridade .....	73
Figura 31 – Abatimento de tronco de cone.....	75
Figura 32 – Moldagem dos corpos de prova .....	76
Figura 33 – Resistência à compressão (MPa) por idade em dias. ....	77
Figura 34 – Variação da resistência aos 28dias (MPa) com teor de ar.....	78
Figura 35 – Variação diária de temperatura (°C) para 19 dias de ensaio .....	78
Figura 36 – Variação diária da umidade (%) para 19 dias de ensaio .....	79
Figura 37 – Espessura média da frente de carbonatação (mm) .....	80
Figura 38 – Carbonatação em concretos com 1,0% de aditivo .....	81
Figura 39 – Suspensão sólida em solução ácida.....	82
Figura 40 – Perda de massa (%) por tipo de concreto e tipo de cura .....	82
Figura 41 – Absorção capilar (g/cm <sup>2</sup> ) por tempo de ensaio (h).....	84
Figura 42 – Absorção total por imersão e fervura por teor de aditivo e cura .....	85
Figura 43 – Índice de vazios por teor de aditivo e tipo de cura.....	86
Figura 44 – Aparato acoplado à parede .....	87
Figura 45 - Manchas devido à percolação de água no Protótipo 3 (C-1,0%).....	88
Figura 46 – Manchas devido à percolação de água no Protótipo 2 (C-0,5%) .....	89
Figura 47 – Parede interna do Protótipo 2 (C-0,5%) após 7h de ensaio.....	89
Figura 48 - Parede interna do Protótipo 1 (C-0,0%) após 7h de ensaio .....	90

# LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1 – Resumo dos empreendimentos da Prefeitura de Uberlândia para o MCMV.....	13
Tabela 2 – Vida útil de projeto mínima e superior em anos (VUP) .....	39
Tabela 3 – Percentual máximo da soma das áreas das manchas de umidade.....	40
Tabela 4 – Condições de ensaio de estanqueidade à água em SVVE .....	40
Tabela 5 – Formação de sais solúveis e insolúveis para cada tipo de ácido.....	53
Tabela 6 – Análise da variância para cálculo da quantidade de amostras .....	57
Tabela 7 – Características e materiais usados na fabricação do concreto .....	59
Tabela 8 – Resumo de quantidade de corpos de prova 10 cm × 20 cm.....	60
Tabela 9 – Abatimento de tronco de cone para concreto sem aditivo .....	75
Tabela 10 – Dados do concreto no estado fresco com aditivo .....	76
Tabela 11 – Resultados ao final do ensaio (72h) e seus coeficientes de variação.....	84

# SUMÁRIO

---

## CAPÍTULO 1

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1     IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	13
1.2     JUSTIFICATIVA .....	14
1.3     OBJETIVOS .....	16
1.4     APRESENTAÇÃO DO TRABALHO .....	16

## CAPÍTULO 2

<b>HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL: SISTEMAS CONSTRUTIVOS</b> .....	18
2.1     INTRODUÇÃO .....	18
2.2     SISTEMAS CONSTRUTIVOS ATUAIS .....	19
2.2.1     Alvenaria Estrutural.....	19
2.2.2     Pré-fabricados.....	21
2.2.3     Sistema construtivo em aço .....	22
2.2.4     Sistema construtivo em madeira.....	23
2.2.5     Paredes de concreto .....	24
2.3     ESPECIFICAÇÕES PARA PAREDES DE CONCRETO .....	25

## CAPÍTULO 3

<b>ADITIVO INCORPORADOR DE AR PARA CONCRETO</b> .....	28
3.1     INTRODUÇÃO .....	28
3.1.1     Superplastificantes.....	29
3.1.2     Tensoativos Incorporadores de ar.....	29

## CAPÍTULO 4

<b>DURABILIDADE E DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES</b> .....	36
4.1     INTRODUÇÃO .....	36
4.2     DESEMPENHO DAS ESTRUTURAS .....	37
4.2.1     Prescrições normativas para o desempenho de edificações.....	37
4.2.2     Prescrições da ABNT NBR 15575 para o sistema de vedações verticais .....	39
4.3     TRANSPORTE DE MASSA NO CONCRETO .....	41
4.3.1     Estrutura porosa do concreto .....	42
4.3.2     Permeabilidade .....	43
4.3.3     Difusão .....	44

4.3.4	Absorção capilar .....	45
4.4	CARBONATAÇÃO .....	45
4.4.1	Visão geral sobre a carbonatação .....	45
4.4.2	Processos de carbonatação.....	47
4.4.3	Consequências da carbonatação .....	50
4.5	ATAQUE ÁCIDO .....	51
<b>CAPÍTULO 5</b>		
	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	55
5.1	METODOLOGIA .....	55
5.2	ESTIMATIVA ESTATÍSTICA DO NÚMERO DE ENSAIOS .....	56
5.3	MATERIAIS .....	58
5.3.1	Especificação dos materiais.....	58
5.3.2	Cálculo da quantidade de material necessário.....	59
5.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	60
5.5	ENSAIOS.....	63
5.5.1	Ensaio no estado fresco.....	63
5.5.2	Ensaio de carbonatação acelerada .....	63
5.5.3	Ensaio de ataque ácido .....	68
5.5.4	Ensaio de estanqueidade.....	70
5.5.5	Ensaio de absorção de água por capilaridade .....	73
5.5.6	Ensaio de absorção de água por imersão .....	74
<b>CAPÍTULO 6</b>		
	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	75
6.1	Estado Fresco.....	75
6.2	Resistência à compressão.....	77
6.3	Carbonatação Acelerada .....	78
6.4	Ataque ácido .....	81
6.5	Absorção por capilaridade .....	83
6.6	Absorção por Imersão .....	85
6.7	Estanqueidade .....	87
<b>CAPÍTULO 7</b>		
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	91
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	94

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Atualmente existe a necessidade de resolução ou ao menos minimização dos problemas gerados pelo déficit habitacional que ocorre no Brasil. Em âmbito local, a Prefeitura de Uberlândia tem desenvolvido ações para lidar com o problema por meio da Secretaria da Habitação, em conjunto com o Governo Federal.

Nos últimos anos, somente em Uberlândia foram realizados vários empreendimentos residenciais e a maioria em paredes de concreto. Um resumo de todos os empreendimentos do Programa Minha Casa Minha Vida – PMCMV para Uberlândia estão relacionados na Tabela 1, para o total idealizado pela Prefeitura em sua última gestão, de entregar 10 mil unidades habitacionais.

Tabela 1 – Resumo dos empreendimentos da Prefeitura de Uberlândia para o MCMV

<b>Moradias para a Faixa I -</b> Salários até R\$ 1600,00	<b>Total</b>	<b>Moradias para a faixa II - Salários</b> de R\$ 1600,00 a R\$3275,00	<b>Total</b>
Residencial Tocantins	576 aptos	Residencial Lago Azul	620 casas
Residencial Córrego do Óleo	1600 aptos	Residencial Colinas do Sul	680 casas
Residencial Monte Hebron	2000 casas	Residencial Monte Hebron	140 casas
Residencial Pequis	3200 casas	Apartamentos diversos	1184
<b>TOTAL</b>	<b>7376</b>	<b>TOTAL</b>	<b>2624</b>

Fonte: Autor

Dentre os apartamentos diversos citados na Tabela 1 encontram-se os realizados em bairros como Morumbi, Chácaras Panorama, Shopping Park, Jardim Ipanema e Canaã. Além dos citados, há outros residenciais na cidade que foram construídos com o sistema de paredes de concreto e que foram finalizados antes de 2013, que não constam na Tabela 1. A empresa Rodobens construiu 1886 unidades de habitações de interesse social que se enquadravam no PMCMV, próximo ao aeroporto da cidade (RODOBENS, 2015).

Como pode ser observado, muitas habitações de interesse social foram e estão sendo construídas na cidade. Nesse âmbito, chamar a atenção para a qualidade e durabilidade dessas estruturas é primordial mediante um estudo aprofundado do seu comportamento a longo prazo.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Para atendimento da demanda do mercado imobiliário e aos programas habitacionais nos prazos estabelecidos, as construtoras optaram pelo sistema construtivo de parede de concreto armado. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland –ABCP (2014) o sistema foi largamente implementado tendo em vista a sua maior rapidez de execução e maior economia no canteiro de obras. Atualmente vários empreendimentos com este sistema se encontram em andamento no município.

Este sistema construtivo tem boa viabilidade econômica e que proporciona construções em larga escala. Em visita ao local da construção foram observadas as técnicas usadas para a construção destas moradias, que podem ser vistas na Figura 1. Entre as técnicas utilizadas estão a montagem de formas com telas metálicas, a amarração dos conduítes diretamente nas malhas para devido embutimento, utilização de formas metálicas e o uso de radiers como fundação rasa (Figura 1).

Figura 1 – Execução de armação do sistema paredes de concreto armado – Res. Pequis.



Fonte: Autor

A escolha das formas metálicas é um dos fatores que pode ser apontado para contribuir para a viabilidade econômica do empreendimento, pois esse tipo de forma apresenta uma alta taxa de reutilização, somado ao fato de haver padronização e repetição de plantas para a construção destas moradias de interesse social.

Ademais, para facilitar o manuseio, lançamento e adensamento do concreto, além de se poupar tempo despendido com mão-de-obra, tem sido adicionado ao concreto usinado, além dos aditivos superplastificantes, os incorporadores de ar. Essa decisão, embora comercial, necessita de estudos que comprovem a qualidade e a durabilidade dessas estruturas, devido à ausência de normalização para este fim específico.

Adicionalmente, diversos vícios construtivos e possíveis irregularidades dos materiais aplicados, podem resultar em patologias que afetam tanto o conforto quanto as condições físicas das estruturas. Assim, surge a necessidade de uma análise que mostre o comportamento do material ao longo de sua vida útil, nestas condições de execução.

### **1.3 OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho foi avaliar parâmetros de desempenho relativos à durabilidade de paredes de concreto, que constituem um sistema de vedação vertical comumente utilizado em residências, introduzindo o aditivo incorporador de ar no concreto.

Assim, foi feita a avaliação da influência do teor de ar incorporado no transporte de água no concreto, tanto pela análise da permeabilidade, como absorção capilar e absorção sob fervura, ou estanqueidade do concreto. Avaliação da profundidade de carbonatação do concreto, ou mais especificamente, na característica de avanço da frente de carbonatação quando submetida à vários teores de ar incorporado. Do mesmo modo, a análise da influência do teor de ar incorporado na perda de massa da peça devido ao ataque de substâncias ácidas.

### **1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO**

Este trabalho é constituído de cinco capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1: apresenta uma visão geral sobre a situação da habitação de interesse social em Uberlândia, a problemática do tema e sua importância.
- Capítulo 2: discorre sobre os diversos métodos construtivos, com enfoque no sistema construtivo de paredes de concreto armado moldado no local e suas especificações e possíveis problemas.
- Capítulo 3: apresenta considerações sobre a ação do aditivo incorporador de ar nas propriedades do concreto e sua influência.
- Capítulo 4: aborda o conceito de durabilidade e desempenho das estruturas e elucida sobre o transporte de fluídos dentro do concreto e os conceitos de permeabilidade, a carbonatação e ataque ácido.

- Capítulo 5: apresenta a metodologia experimental e procedimento experimental adotado para realização dos ensaios desta pesquisa, assim como suas dificuldades.
- Capítulo 6: Expõe os resultados para cada experimento e discorre acerca dos mesmos, segundo resultados de outros pesquisadores e segundo os capítulos anteriores.
- Capítulo 7: Considerações finais e as conclusões deste trabalho.

# CAPÍTULO 2

## HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL: SISTEMAS CONSTRUTIVOS

### 2.1 INTRODUÇÃO

O déficit habitacional brasileiro é índice estimado, de acordo com Ribeiro (2014), levantando-se dados de quatro categorias. Entre elas encontram-se os domicílios precários, coabitação familiar, ônus excessivo com aluguel urbano e adensamento excessivo de domicílios alugados; conforme descrições a seguir:

- ❖ Domicílios precários: locais sem fins residenciais que servem como moradia alternativa;
- ❖ Coabitação familiar: quando há famílias conviventes e secundárias que desejam constituir um novo domicílio;
- ❖ Ônus excessivo com aluguel urbano: corresponde à parcela da população que despende mais de 30% do seu rendimento mensal com aluguel;
- ❖ Adensamento excessivo de domicílios alugados: corresponde a domicílios alugados com um número médio superior a três moradores por dormitório.

O resultado do cálculo deste índice para o ano de 2012 mostrou um déficit habitacional de 5,792 milhões de domicílios, equivalente a 9,1% de déficit relativo nacional (RIBEIRO, 2014). A região sudeste é a que possui o maior déficit habitacional absoluto, com 2,184

milhões de moradias e o estado de Minas Gerais detém 23,35% deste total (necessidade de 510 mil moradias).

Para suprir a demanda do déficit habitacional brasileiro, o governo federal criou vários programas de incentivo ao crédito para financiamentos habitacionais, entre eles o Minha Casa Minha Vida. O desafio de reduzir esse déficit tem sido encarado, sob a visão do PMCMV (Programa de Crédito Solidário), com construção de habitações de interesse social que, por sua vez tem possibilitado o surgimento de uma variada gama de processos construtivos alternativos aos processos tradicionais, como a alvenaria.

A viabilidade desses novos sistemas construtivos se depara, no entanto, com a pouca disponibilidade de informações técnicas a respeito, que aborde de maneira eficaz todas as variáveis de projeto e execução para fins de padronização e normalização, assim como informações sobre a durabilidade das estruturas.

## **2.2 SISTEMAS CONSTRUTIVOS ATUAIS**

O sistema construtivo convencional de alvenaria de tijolos cerâmicos, ainda largamente utilizado, está sendo substituído por outros sistemas como alvenaria estrutural, pré-moldados, sistema construtivo em aço ou madeira e paredes de concreto.

### **2.2.1 Alvenaria Estrutural**

Este sistema pode ser executado tanto com blocos de concreto, quanto com blocos cerâmicos. A principal característica deste sistema construtivo é que com o uso racional dos blocos, devido à modulação necessária, o desperdício dos materiais e de formas é reduzido. No entanto, este sistema construtivo requer uma grande quantidade de mão-de-obra que muitas vezes pode não ser bem qualificada (Figura 2).

No município de Uberlândia foi notória a inadequação de determinadas edificações construídas com este sistema estrutural, além de diversas patologias e defeitos apresentados

logo após a sua conclusão. Este fato mostra essencialmente a falta de preparo da mão-de-obra e de treinamentos por parte dos empregadores, para lidar com um sistema que foi concebido para racionalizar a construção.

Figura 2 – Construção em alvenaria estrutural com blocos de concreto



Fonte: ABCP (2010)

A alvenaria de blocos cerâmicos também é utilizada e nesse caso fica ligada à disponibilidade do material na região já que a qualidade dos materiais cerâmicos é altamente influenciada pelas suas jazidas de origem e processos de queima. Os blocos cerâmicos são materiais predominantemente argilosos, que necessitam de cozimento para que haja a formação da fase vítreia, a temperaturas entre 900°C e 1100°C, sendo considerados como materiais de baixa vitrificação (BAUER, 2013).

Segundo Souza (2009) as alvenarias estruturais com blocos cerâmicos possuem bom desempenho térmico e maior durabilidade que as alvenarias com outros tipos de blocos, uma vez que nas primeiras, as deformações em função das variações térmicas são extremamente inferiores.

### 2.2.2 Pré-fabricados

A pré-fabricação de elementos é uma maneira de aumentar o nível de industrialização do setor da construção civil. A norma ABNT NBR 9062:2006 em seu item 3.11 especifica que os elementos pré-fabricados são aqueles executados sob rigoroso controle de qualidade, em instalações permanentes de empresa destinada a este fim. Ainda segundo a mesma, a mão-de-obra deve ser treinada, especializada e capacitada, os elementos devem ser produzidos com máquinas e equipamentos industriais que racionalizem o processo.

Entre esses processos se encontra o processo *tilt up* que se caracteriza pela moldagem, adensamento e cura dos elementos estruturais em formas horizontais e logo após, quando atingida a resistência especificada em projeto no número de dias determinado, essas peças são içadas para sua posição final. Quando colocadas em sua posição final, as peças são escoradas para que não haja o tombamento, e somente serão solidarizadas quando for colocada a laje de cobertura.

Este tipo de sistema construtivo requer um controle rigoroso de todas as etapas do processo construtivo, desde condições de concretagem, fases de produção até as etapas de içamento e escoramento (Figura 3). Caso o elemento estrutural não tenha atingido a resistência especificada para a próxima etapa, podem ser impostas à peça um estado de tensões para o qual não foi concebido, deformando permanentemente o mesmo.

Figura 3 – Içamento de elementos pré-fabricados em canteiro.



Fonte: [www.grupoferres.com](http://www.grupoferres.com)

Fora estes possíveis inconvenientes, esse sistema oferece vantagens como baixo tempo de construção e baixo custo inicial, além da padronização e maior controle sobre as peças. Ainda existem outros tipos de painéis que podem ser utilizados para edificações de interesse social como o caso de painéis de alvenaria, painéis alveolares, painéis duplos treliçados, entre outros.

### 2.2.3 Sistema construtivo em aço

A estrutura de perfil de aço leve consiste em armações de aço e duplas paredes de gesso ou de outros painéis de vedação para garantir o devido isolamento térmico e acústico. A Figura 4 ilustra este sistema, que é notadamente conhecido como *steel frame*, e os painéis de vedação conhecidos como *dry wall*.

Figura 4 – Sistema construtivo steel frame



Fonte: *Light Steel Framing*, 2015

O sistema, amplamente utilizado nos Estados Unidos, começa a ser implementado no Brasil desde 2012 com a obra pioneira em Ponta Grossa (

Figura 4). A implementação em Ponta Grossa foi bem sucedida e serve atualmente de exemplo para outros municípios. Este sistema possui vantagens e desvantagens, que são apontadas por Souza (2009) em seu trabalho:

- ❖ Vantagens: atende à prazos curtos; requer menos mão-de-obra; o material é racionalizado devido ao planejamento feito anteriormente; obra limpa sem depósitos de entulho; flexibilidade de reformas e possibilidade de reciclagem dos perfis de aço.
- ❖ Desvantagens: riscos de custos maiores caso haja falta de planejamento, dificuldade de transporte, necessidade de amarração e problemas com dilatação térmica.

#### 2.2.4 Sistema construtivo em madeira

O sistema construtivo em madeira utiliza de peças aparelhadas e perfiladas, de forma que atenda ao projeto e tenha sua montagem facilitada. Ou seja, as peças estruturais são produzidas industrialmente, para que seja feita somente a montagem dos perfis no local. Ainda assim, podem ser divididos de acordo com Sustentabilidade (2012) em Wood-frame, definido pela justaposição de elementos que compõem a parede de madeira estruturada; e Wood-log, definida pela superposição de elementos de madeira maciça.

Segundo Souza (2009), o processo de montagem, ilustrado na Figura 5 se dá fazendo uso de perfis estruturais que servirão como elementos para montantes, panos de paredes, cantos para a mudança de planos, montagem de divisórias e vigotas de travessamento da estrutura, encaixados entre si.

Figura 5 – Casa construída em painéis de madeira transformada



Fonte: Wood Frame, 2015

Embora ainda não muito difundida no Brasil devido a fatores culturais, as casas de madeira não largamente usadas no exterior, como por exemplo, nos Estados Unidos, graças ao seu baixo peso próprio e rapidez de montagem se comparado à alvenaria convencional.

### 2.2.5 Paredes de concreto

O sistema construtivo de paredes de concreto surge com a proposta de fazer da estrutura e vedação, um único elemento que teria as tubulações de instalações embutidas e resistiriam à ação de agentes agressivos e intemperismos. Esse sistema admite o uso de concretos auto adensáveis, concretos leves e concreto celular, com peso específico da ordem de 2.300 kg/m<sup>3</sup> a 2.500 kg/m<sup>3</sup> para os concretos normais; 1.600 kg/m<sup>3</sup> a 1.900 kg/m<sup>3</sup> para concretos leves, e 400 kg/m<sup>3</sup> a 1600 kg/m<sup>3</sup> para os celulares (ECOPORE, 2015).

Graças à incorporação de ar, os concretos modificados são usados para preenchimento de vãos de lajes, paredes estruturais e/ou paredes de vedação como mostrado na Figura 6, desempenhando também papel de isolante térmico e acústico (CINTRA, 2015). Também apresentam como características rápidas produção e aplicação, além de uma ótima trabalhabilidade, dispensando algumas vezes a etapa de adensamento.

Figura 6 – Moradias de interesse social construídas com paredes de concreto – Residencial Pequis



Fonte: Autor

Para um grande canteiro de obras, como o do Residencial Pequis, esse sistema consegue alcançar uma alta produtividade com uma boa gestão do canteiro. A alta produtividade também é alcançada com a industrialização de alguns serviços, assim como com a utilização de formas metálicas que permite agilidade na montagem e desmontagem das formas.

### **2.3 ESPECIFICAÇÕES PARA PAREDES DE CONCRETO**

O sistema de paredes de concreto é definido pela ABNT NBR 16055:2012 como sendo paredes que serão concretadas com todos os elementos que farão parte da construção final, tais como detalhes da fachada (frisos ou rebaixos), armaduras distribuídas e localizadas, instalações elétricas e hidráulicas (quando embutidas); e considera ainda as lajes incorporadas ao sistema por solidarização com as paredes, tornando o sistema monolítico (funcionamento de placa e membrana).

Além disto, a norma se refere somente a paredes que estejam submetidas a cargas axiais, com ou sem flexão, não podendo ser submetidas predominantemente a carregamentos horizontais, como no caso de muros de arrimo ou reservatórios. Os únicos esforços horizontais obrigatórios a serem considerados são as ações originadas pelo vento e o desaprumo. Para ser classificado neste sistema, também devem possuir lajes de vão livre de no máximo 4 m e sobrecarga máxima de 300 kgf/m<sup>2</sup> e pé direito de no máximo 3 m.

Uma parede de concreto, por sua vez, é definida pela ABNT NBR 6118:2014 como elemento estrutural autoportante, moldado no local, com comprimento maior que dez vezes sua espessura e capaz de suportar carga no mesmo plano da parede. No item 13.1 da ABNT NBR 16055:2012 é especificada a dimensão mínima de paredes com alturas máximas de 3 m, sendo então permitido paredes de 10 cm de espessura com variação máxima de 5 cm.

No canteiro de obras visitado, observou-se o enquadramento das plantas baixas das moradias em questão em todos requisitos previamente citados. Foi adotada a dimensão mínima especificada para a espessura das paredes, assim como o uso de espaçadores, de

acordo com a Figura 7, para garantir a centralização das armaduras nas formas durante a concretagem e suas espessuras de cobrimento.

Figura 7 – Armaduras verticais de paredes com dimensão de 10cm.



Fonte: Autor

Mesmo assim pode-se observar na Figura 7 uma falta de alinhamento quanto ao posicionamento da armadura em relação ao eixo da viga baldrame, mostrando que os espaçadores podem estar mal encaixados ou a ancoragem da armadura foi feita indevidamente. Apesar de haver uma tolerância de 2cm em pontos isolados (ABNT NBR 16055:2012), esse problema, mesmo que corriqueiro em canteiros de obras, pode levar à uma diminuição do cobrimento nominal das armaduras e ser uma entrada preferencial de agentes agressivos que podem, com o decorrer do tempo, colocar a integridade das armaduras em risco.

A norma ABNT NBR 16055:2012 prescreve um plano de garantia da qualidade da estrutura, elaborado pelo projetista em comum acordo com o construtor que sirva de acompanhamento para que a estrutura tenha o devido desempenho durante sua vida útil. Este plano de garantia deve estabelecer procedimentos de controle da qualidade de acordo

com a ABNT NBR 16055:2012 e com a ABNT NBR 6118:2014 e deve ser seguido para que ocorra o mínimo destes defeitos na construção. Os critérios de projeto para a segurança e durabilidade das paredes de concreto na ABNT NBR 16055:2012, são aqueles recomendados pela ABNT NBR 6118:2014.

Para a execução das instalações, a norma ABNT NBR 16055:2012 especifica que as tubulações verticais podem ser embutidas nas paredes desde que a diferença de temperatura no contato entre a tubulação e o concreto não ultrapasse 15°C; a pressão interna da tubulação não ultrapasse 0,3 MPa; o diâmetro máximo da tubulação seja de 50 mm e que tubulações metálicas não encostem nas armaduras, para evitar o risco de corrosão galvânica.

Além destas especificações, tubulações horizontais não podem ter seus comprimentos excedidos em mais de um terço do comprimento das paredes, ou um metro e esse trecho deve ser considerado não estrutural. Não podem ser feitas aberturas nas paredes ou serem removidas sem o consentimento do projetista.

## CAPÍTULO 3

# ADITIVO INCORPORADOR DE AR PARA CONCRETO

### 3.1 INTRODUÇÃO

A modificação das propriedades do concreto seja no estado fresco ou no estado endurecido tem sido utilizada para melhoria de algumas características ou para situações específicas de engenharia.

Esses aditivos variam muito em sua composição podendo ser desde surfactantes, sais solúveis até minerais insolúveis e polímeros. São comumente usados no concreto para melhorar a trabalhabilidade ou diminuir o fator a/c; acelerar ou retardar o tempo de pega; controlar o desenvolvimento da resistência e a taxa de liberação de calor; controle da fissuração térmica; expansão álcali-agregado; ataques por sulfatos e resistência à corrosão das armaduras (MEHTA e MONTEIRO, 2014) (BAUER, 2013).

As classificações de aditivos podem seguir diversos critérios, podendo ser utilizado como critério o tipo de ação, como ação física ou química, ou de acordo com a sua finalidade. A classificação de acordo com a finalidade pode não elucidar o tipo de substância química do qual ele é feito, ou mesmo as consequências secundárias da sua adição. Hoje sabe-se que mesmo um aditivo que se enquadra como modificador de uma determinada propriedade, poderá apresentar determinados efeitos colaterais. O aditivo empregado nesta pesquisa é classificado como aditivo químico tensoativo e o concreto fornecido continha aditivo superplastificante, que também pode incorporar ar ao concreto.

### 3.1.1 Superplasticificantes

Também conhecidos como redutores de água de alta eficiência, consistem em surfactantes aniônicos de cadeia longa e de alta massa molecular com muitos grupos polares na cadeia de hidrocarbonetos. Quando adsorvido nas partículas de cimento, segundo Mehta e Monteiro (2014), o surfactante confere forte carga negativa que ajuda a diminuir consideravelmente a tensão superficial da água circundante e eleva acentuadamente a fluidez do sistema.

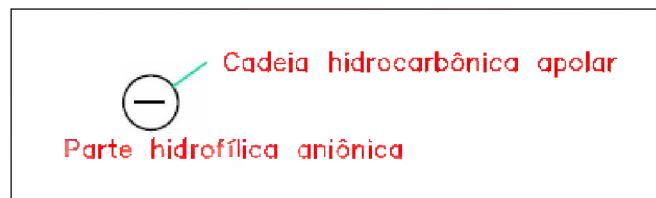
Como obtém-se uma melhor dispersão das partículas de cimento na água, a taxa de hidratação é acelerada, ao contrário do que ocorre com aditivos comuns redutores de água. Atualmente, os produtos disponíveis no mercado contêm lignossulfonatos ou outros materiais retardadores (MEHTA e MONTEIRO, 2014) para evitar a perda rápida da consistência adquirida logo após a mistura.

Atualmente os superplasticificantes mais utilizados são poli melamina sulfonato (PS), poli naftaleno sulfonato (PNS), os novos produtos à base de policarboxilatos (PC) e polimetacrilatos.

### 3.1.2 Tensoativos Incorporadores de ar

Esses aditivos são essencialmente moléculas orgânicas de cadeia longa, formados por uma extremidade hidrofílica e outra hidrofóbica, esta última formada por cadeias apolares e a parte hidrofílica contém um ou mais grupos polares aniônicos (Figura 8).

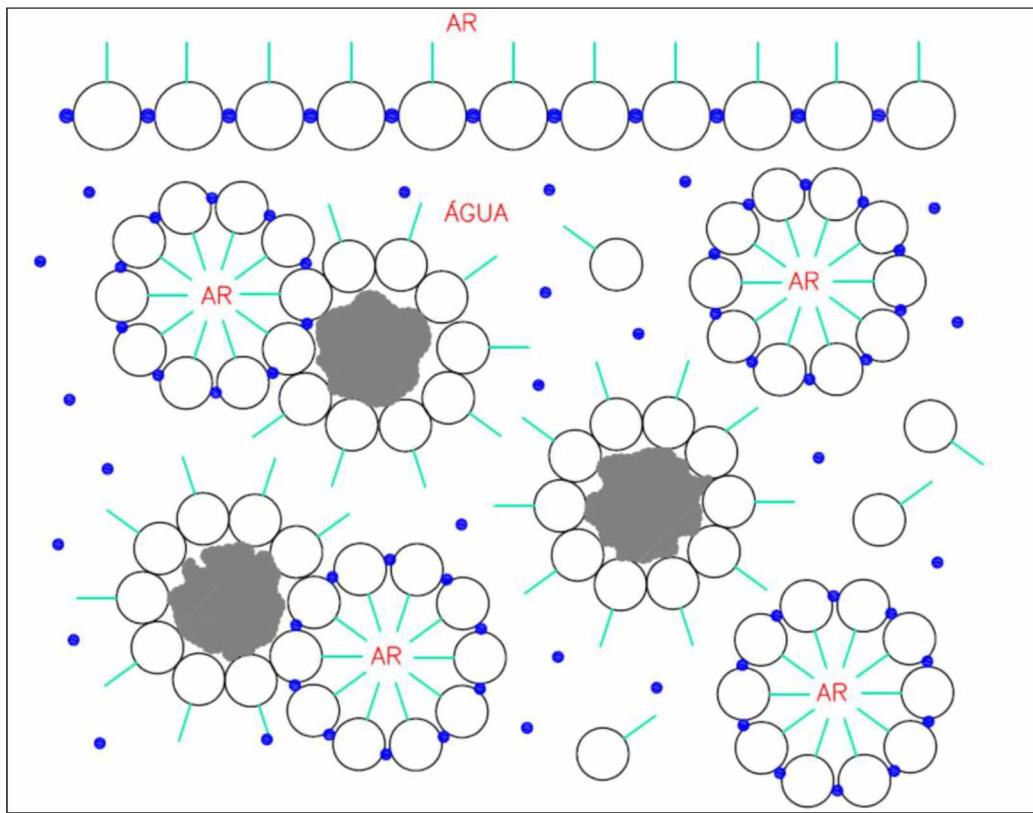
Figura 8 – Estrutura típica de um aditivo tensoativo incorporador de ar



Fonte: Autor

Quando adicionados à pasta, na interface da mistura com o ar os grupos polares orientam-se para a fase aquosa, reduzindo a tensão superficial da água, facilitando a formação de bolhas, que são, por sua vez, estáveis. Essas bolhas são microscópicas e não tendem a coalescer, como ocorre no concreto normal sem adição de aditivos, a não ser quando submetidos a vibração intensa. A Figura 9 representa bem esta estrutura gerada por tensoativos quando adicionados à pasta de cimento.

Figura 9 – Estrutura típica de um tensoativo incorporador de ar na pasta de cimento



Fonte: Autor

As bolhas incorporadas são consideradas estáveis pois para que ela pudesse ser rompida, deveria aumentar até que vencesse a tensão superficial (BAUER, 2013). No entanto, com a adição do tensoativo, o sistema microscópico equilibra-se, e as bolhas não tendem a aumentar e coalescer. Ainda que por muito tempo o modelo para incorporação de ar no concreto fosse considerado como bolhas uniformes e esféricas igualmente dispersas na pasta de cimento, Mayercsik (2014) mostra em seu trabalho que esse modelo não se aproxima da realidade.

Na interface sólido-água, as cadeias aniónicas são direcionadas para a superfície do grão de cimento, mantendo-se os grupos apolares orientados para a fase aquosa. Essa configuração mostrada na Figura 9 ainda permite que os grãos de cimento se liguem diretamente às bolhas devido ao direcionamento das cadeias do aditivo, quando as bolhas de ar se aproximam do sistema aditivo-sólido.

Estudos têm sido feitos em relação à caracterização da microestrutura de concretos, seja em estado fresco ou em estado endurecido, quando submetidos à incorporação de ar por meio de aditivos. A estabilidade das bolhas de ar, forma, influência do fator água/cimento, tipo de aditivo e de materiais, assim como a dosagem destes e o método de mistura, influenciam na microestrutura do concreto. Para tanto, tem sido utilizado outros métodos de análises de imagem como a Microscopia Eletrônica de Varredura-MEV.

Segundo Mayercsik (2014), o problema fundamental da análise bidimensional é que dois vazios que podem parecer iguais vieram de bolhas de tamanhos diferentes. Assim, análises de imagem podem causar problemas na previsão da estrutura tridimensional do concreto, pois quando cortes seccionam um sistema de esferas dispersas, alguns vazios grandes podem ser seccionados pela extremidade enquanto outros podem ser cortados pela sua seção de maior diâmetro.

Segundo Bauer (2013), as vantagens da incorporação de ar são inúmeras, entre elas o fato de que as bolhas podem ser consideradas como um agregado miúdo (areia fina) com melhores coeficientes de forma e com movimento facilitado devido à redução de atrito. Como age como um lubrificante, ele melhora as propriedades reológicas do concreto fresco, facilita o lançamento, aumenta a coesão e diminui a exsudação.

Em outros estudos comprova-se também que o aumento do teor de incorporação de ar provoca diminuição de outras propriedades no estado endurecido, como o caso da resistência à compressão. Como o concreto é formado por cerca de 65-75% de agregados e todas as bolhas de ar se encontram na pasta de cimento, de acordo com Wong (2011), um pequeno teor de ar incorporado pode gerar uma mudança significativa na microestrutura da

pasta. Ainda segundo o mesmo autor, um bom exemplo disso é a perda de resistência à compressão: 1% de teor de ar incorporado pode resultar em decréscimo de 5% na resistência à compressão, para concretos com o mesmo fator água/cimento.

Outras propriedades também sofrem os efeitos do incremento de bolhas microscópicas de ar, tais como a permeabilidade e capilaridade, assim como os fenômenos de transporte de massa que são extremamente ligados à durabilidade do concreto. As bolhas de ar são penetráveis, no entanto como aparecem na estrutura da pasta de maneira estável e isolada, não criam os canais necessários para que ocorra o transporte de massa.

### *3.1.2.1 Fatores influenciadores no teor de ar incorporado*

Alguns dos fatores que influenciam no resultado da quantidade de ar incorporado são os aditivos em si, o cimento, a relação água/cimento, os agregados, e o tipo de mistura. Esses fatores influenciam de modo que:

- ❖ Aditivos: a natureza química do aditivo influenciará no volume de ar incorporado, na dimensão e distribuição das bolhas e na resistência e estabilidade das mesmas;
- ❖ Cimento: o cimento pode afetar a quantidade de ar incorporado devido à sua natureza, dosagem e principalmente em relação à sua finura. Se o cimento for mais fino e tiver menos sulfatos e álcalis solúveis, terá um menor teor de ar incorporado.
- ❖ Fator água/cimento: afeta não somente o teor de ar incorporado como também a distribuição das bolhas e o seu diâmetro, sendo tanto maior quanto maior for o fator água/cimento.
- ❖ Agregados: a forma das areias e sua regularidade agem no aumento da incorporação de ar, para grãos de granulometria entre 0,2 e 0,8mm.
- ❖ Mistura: vários fatores ligados à mistura podem influenciar a quantidade de ar incorporado como o modo de como a mistura é feita (se manual ou mecânica), o tipo da betoneira (de eixo vertical ou horizontal), a energia e o tempo de mistura (energias muito altas e tempos extendidos de mistura acabam por colmatar as bolhas que foram incorporadas segundo Mehta e Monteiro (2014)).

- ❖ Adensamento: o tempo de adensamento pode influenciar no sentido de diminuir o teor de ar incorporado, pois uma alta energia de vibração, assim como um tempo muito longo, pode desfazer as bolhas de ar.
- ❖ Dosagem: uma dosagem excessiva de aditivo aumenta tanto o teor de ar incorporado que pode resultar na diminuição da resistência à compressão. Além disso, como os surfactantes tornam as partículas de cimento hidrofóbicas, uma dosagem excessiva pode causar um retardamento das reações de hidratação do cimento. (MEHTA E MONTEIRO, 2014)

### *3.1.2.2 Consequências da incorporação de ar*

A caracterização da microestrutura de concretos com ar incorporado é feita preferencialmente no estado endurecido pois segundo Piekarczyk (2013), a previsibilidade da microestrutura no estado fresco é extremamente complexa. As bolhas de ar no concreto no estado fresco são inherentemente instáveis para este tipo de análise devido às interfaces entre o ar dispersado e a matriz envolvente. As reações de hidratação do cimento, segundo o mesmo autor, e a termodinâmica envolvida no processo de cristalização tende a reduzir essas zonas de interface ou simplesmente à agitação intensa os vazios tendem a coalescer. Por isso comumente no estado fresco é feito somente o ensaio de caracterização do teor de ar total.

Outras propriedades também sofrem alteração com as mudanças na microestrutura tais como a permeabilidade e absorção por capilaridade. Segundo Hanzic e Ilic (2003), com o aumento do teor de aditivo normalmente tem-se uma redução na absorção de água, pela desconexão dos capilares provocada pelas bolhas de ar. Ainda com este mesmo raciocínio, a causa da diminuição de tais propriedades também pode ser explicada em termos da diminuição do fator água/cimento quando fixado o parâmetro do abatimento por tronco de cone, para se assegurar a trabalhabilidade do material.

Sendo assim, para os ensaios de capilaridade, normalmente não é suficiente submergir os corpos de prova em água para que ocorra a penetração da água no interior dos vazios. É

necessário utilizar outra técnica que não a de imersão, como no caso do uso do vácuo, ou da fervura.

Em seu trabalho, Silva (2009) avaliou a influência da adição de aditivos incorporadores de ar nas propriedades do cimento endurecido em argamassas, variando-se a dosagem do aditivo de 0,00%; 0,05%; 0,10%; 0,15% e 0,20% em relação à massa do cimento. Houve uma redução da absorção de água após imersão (WONG,2011) e aumento significativo da absorção de água após a fervura, o que evidencia a característica de desconexão das bolhas de ar criadas pela incorporação de ar. Houve, também, uma diminuição da absorção por capilaridade e da resistência à compressão, exceto para o teor de 0,05%.

A influência da porosidade sobre a resistência à compressão pode ser explicada pelo fato de que as bolhas de ar reduzem a área da seção reta através da qual uma carga é aplicada e, sendo considerada como um defeito, pode-se admitir que atua como fator concentrador de tensões. Sendo, portanto um agente propagador de fissuras. Entretanto, Ramarmurthy *et al.* (2009) mostram que concretos com vazios de dimensões menores apresentam maiores resistências mecânicas, pois esses pequenos vazios têm seu comportamento parecido com o de agregado miúdo.

No estudo feito por Wong (2011), fica evidenciado que as bolhas de ar podem ser tratadas como inclusões similares a partículas de agregados pois causam uma perturbação nos grãos de cimento e na distribuição da porosidade, sendo que este último efeito pode ser negligenciado devido à pequena dimensão destas bolhas em relação aos grãos dos agregados.

Outros trabalhos, como McCarter *et al.* (1983) mostra que a resistividade elétrica do concreto aumenta significativamente com o aumento do teor de ar incorporado, concordando com Wong (2011), no aspecto em que as partículas de ar incorporado se comportam como partículas não condutoras. Wong (2011) mostra também que em situações saturadas, as bolhas de ar se comportam como condutoras.

Em outro estudo, Toutanji (1998) analisou a permeabilidade aos íons cloreto de uma mistura contendo de 2-15% de ar incorporado e relação água/cimento de 0,41. Os resultados mostraram que o aumento do teor de ar incorporado aumentou significativamente a permeabilidade aos íons cloreto pois os corpos de prova eram saturados a vácuo antes de submetidos ao teste de condutividade elétrica, e sendo assim, os poros preenchidos com água contribuiriam para passagem da corrente.

# CAPÍTULO 4

## DURABILIDADE E DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES

### 4.1 INTRODUÇÃO

O conceito de durabilidade é um conceito amplo e de entendimento complexo dos seus fatores intervenientes. O controle dos fatores que acarretam a falta de durabilidade de determinada estrutura se torna primordial para o alcance de um bom desempenho em toda sua vida útil.

As ações deletérias principais estão intimamente ligadas à água e ao seu transporte no meio físico do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2014), como ela está presente em todo tipo de deterioração, a facilidade com que ela entra nos sólidos porosos determina a taxa de deterioração. Por isso a caracterização dos concretos quanto à sua durabilidade, é normalmente feita pela determinação da resistência à penetração de agentes agressivos.

Um dos efeitos químicos que também influenciam negativamente a durabilidade do concreto é a carbonatação e o ataque da pasta de cimento por soluções ácidas. Ambos por serem as principais causas da corrosão das armaduras, podendo levar as estruturas à perda da sua capacidade de sustentação.

Tais manifestações modificam o desempenho futuro das estruturas tornando-as, progressivamente, menos adequadas ao uso. Além da inadequação, tais patologias são de difícil recuperação e bastante onerosas. Por manterem relação direta com o transporte de

massa do concreto, faz-se necessária a descrição da estrutura e as propriedades deste mostrando seus efeitos deletérios sobre os materiais porosos, conforme discussão no item 4.3

## 4.2 DESEMPENHO DAS ESTRUTURAS

Segundo a ABNT NBR 15575-1:2013, o desempenho de uma edificação é definido como o comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas. Essa característica é decrescente em relação ao tempo e deve sempre se manter acima do desempenho requerido para que se tenha a qualidade necessária em cada função.

Vários critérios de desempenho devem ser estabelecidos para que a estrutura tenha a capacidade de desempenhar suas funções ao longo do tempo, sem que ocorram problemas que não decorram do envelhecimento natural da mesma (patologias). Entre esses critérios de desempenho, a norma ABNT NBR 15575-1:2013 estabelece vários requisitos mínimos para a durabilidade e manutenibilidade das estruturas e seus componentes.

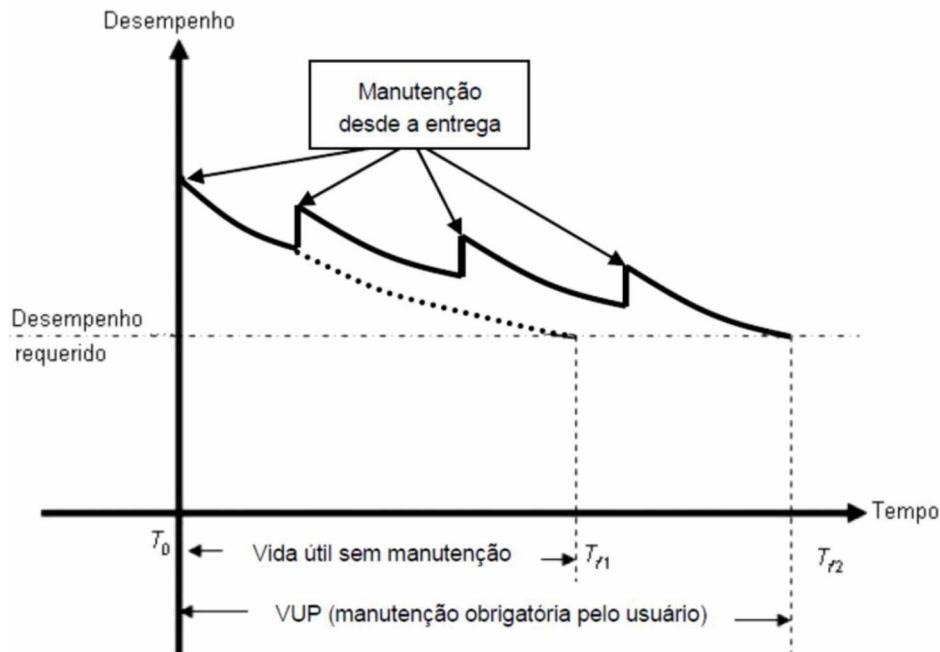
### 4.2.1 Prescrições normativas para o desempenho de edificações

A vida útil de uma edificação é denominada como o período de tempo compreendido entre o início da operação e o momento que seu desempenho deixa de atender às exigências do usuário. A vida útil (VU) deve ser sempre maior ou igual à vida útil de projeto (VUP), pois sem esse critério a tendência do construtor é optar pelo produto de menor custo inicial, porém menos durável, de maior custo de manutenção e provavelmente de maior custo global (ABNT NBR 15575:2013).

Outrossim a vida útil de determinada edificação pode ser aumentada mediante ações de manutenção, que está representada na Figura 10. Essas ações são definidas pelo projetista, a fim de que a vida útil seja atingida. O grande problema entre a garantia da vida útil de determinada parte ou sistema de uma edificação, é que as ações de manutenção são de responsabilidade do usuário. Caso essas ações de manutenção não sejam realizadas,

segundo a ABNT NBR 15575-1:2013 as eventuais patologias resultantes podem ter origem no uso inadequado e não em uma construção falha.

Figura 10 – Desempenho de uma edificação ao longo do tempo



Fonte: Anexo C, ABNT NBR 15575-1:2013

Para que a vida útil de um determinado edifício seja atingida, é necessário que sejam atingidos os seguintes aspectos simultaneamente: (ABNT NBR 15575-1:2013)

- ❖ O emprego de componentes e materiais de qualidade compatível com a VUP;
- ❖ Execução com técnicas e métodos que possibilitem a obtenção da VUP;
- ❖ Cumprimento em sua totalidade dos programas de manutenção corretiva e preventiva;
- ❖ Atendimento aos cuidados preestabelecidos para se fazer uso correto do edifício;
- ❖ Utilização do edifício em concordância ao que foi previsto em projeto.

O projeto de uma estrutura deve ser elaborado para que os sistemas que o compõem tenham vida útil superiores à mínima especificada na Tabela 2, devendo ser elaborados para que os

sistemas tenham uma durabilidade potencial compatível com a vida útil de projeto, ou para que, com a manutenção adequada atinjam a VUP.

Tabela 2 – Vida útil de projeto mínima e superior em anos (VUP)

Sistema	VUP Mínima	VUP Máxima
<b>Estrutura</b>	$\geq 50$	$\geq 75$
<b>Pisos Internos</b>	$\geq 13$	$\geq 20$
<b>Vedaçāo Vertical Externa</b>	$\geq 40$	$\geq 60$
<b>Vedaçāo Vertical Interna</b>	$\geq 20$	$\geq 30$
<b>Cobertura</b>	$\geq 20$	$\geq 30$
<b>Hidrossanitário</b>	$\geq 20$	$\geq 30$

Fonte: ABNT NBR 15575-1:2013

Os valores apresentados na Tabela 2 devem ser usados como balizamento para estabelecer critérios de durabilidade e desempenho mínimo de estruturas, devendo ser considerados os valores mínimos indicados nesta tabela para a vida útil de cada sistema, caso não tenha sido especificado.

Decorridos 50% dos prazos estabelecidos de VUP, contados a partir da data de conclusão da obra, sem a necessidade de intervenções com custo de manutenção e reposição superiores ao custo inicial, considera-se atendido o requisito de Vida Útil de Projeto (VUP), segundo a ABNT NBR 15575-1:2013.

#### 4.2.2 Prescrições da ABNT NBR 15575 para o sistema de vedações verticais

Os sistemas de vedação vertical interno e externo (SVVIE) quando executados como elementos estruturais, devem ser ensaiados nas mesmas condições do emprego da obra, segundo o item 7.1.1.2 da ABNT NBR 15575-4:2013 com altura prevista para o pé-direito e largura mínima de 1,20m ou de 5 vezes a espessura para paredes monolíticas.

Os SVVIE também devem ser estanques à água da chuva ou provenientes de outras fontes, incluindo a junção entre a janela e a parede, sem aparecer infiltrações que proporcionem borrifamentos ou escorrimientos ou formação de gotas de água aderentes na face interna. Somente podem ocorrer pequenas manchas de umidade com áreas limitadas às mostradas na Tabela 3, especificadas em porcentagem da soma das áreas das manchas de umidade na face oposta à incidência da água, em relação à área total do corpo de prova submetido à aspersão de água ao final do ensaio.

Tabela 3 – Percentual máximo da soma das áreas das manchas de umidade

<b>Edificação</b>	<b>Tempo de ensaio (h)</b>	<b>Percentual máximo da soma das áreas das manchas de umidade</b>
<b>Térrea (com ou sem função estrutural)</b>	7	10
<b>Com mais de um pavimento (com ou sem função estrutural)</b>	7	5

Fonte: adaptado da Tabela 12 da ABNT NBR 15575-4:2013

Esse percentual máximo de manchas de umidade pode ser verificado testando-se a vedação vertical interna ou externa à estanqueidade, como proposto pela norma ABNT NBR 15575-4:2013 para verificação de uma condição mínima de desempenho das paredes. Segundo esta norma, o Brasil possui 5 regiões diferentes de exposição ao vento à qual os SVVIE são frequentemente submetidos, as pressões médias do vento indicadas na Tabela 4.

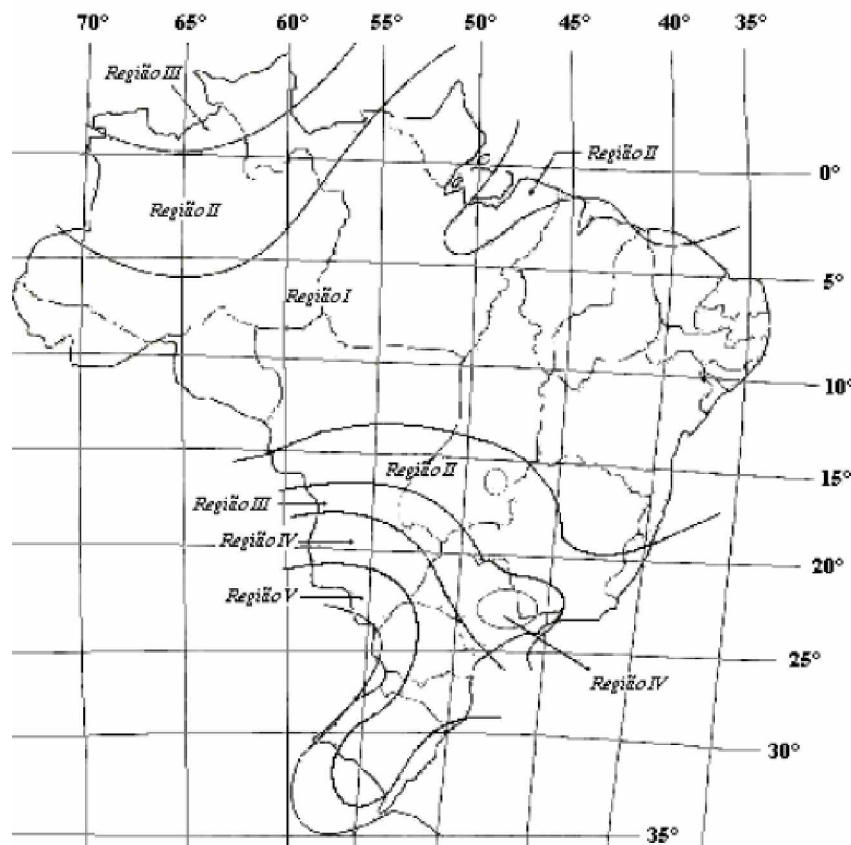
Tabela 4 – Condições de ensaio de estanqueidade à água em SVVE

<b>Região do Brasil</b>	<b>Pressão Estática (Pa)</b>	<b>Vazão de água (L/m<sup>2</sup>.min)</b>
<b>I</b>	10	
<b>II</b>	20	
<b>III</b>	30	3,0
<b>IV</b>	40	
<b>V</b>	50	

Fonte: adaptado da Tabela 11 da ABNT NBR 15575-4:2013

Estas regiões estão representadas na Figura 11, onde pode-se observar que o município de Uberlândia encontra-se na Região II e a região próxima ao município se encontra na Região III. Assim sendo, as pressões estáticas do vento ficam contidas nesta faixa de valores de 20 a 30 Pa.

Figura 11 – Condições de exposição ao vento conforme as regiões brasileiras



Fonte: ABNT NBR 15575-4:2013

### 4.3 TRANSPORTE DE MASSA NO CONCRETO

Vários mecanismos físico-químicos governam o transporte de substâncias agressivas no concreto. Segundo Da Silva (2011), esses mecanismos dependem do fluxo da substância e de sua concentração local, das condições ambientais, da velocidade de renovação dos agentes agressivos, da estrutura e dimensões dos poros, ou abertura das microfissuras, do grau de saturação do sistema poroso e da temperatura.

As características do transporte são difíceis de serem definidas, uma vez que dependem de muitas variáveis, tais como a composição do concreto, o tipo de materiais, a idade (e por consequência o grau de hidratação), da cura e da umidade do concreto. Os mecanismos mais correntes são a permeabilidade, difusão, a absorção capilar e a migração, ou uma combinação entre eles uma vez que podem ocorrer simultaneamente (DA SILVA, 2011).

#### **4.3.1 Estrutura porosa do concreto**

Na estrutura porosa o transporte ocorre predominantemente nos macroporos e microporos sendo que somente os poros interconectados participam do transporte de substâncias. Segundo Houst e Wittmann (1994), a determinação da porosidade é complexa sendo determinada indiretamente quando se realiza os ensaios de permeabilidade, de difusão e de migração. Segundo Da Silva (2011) a porosidade ainda pode ser determinada em ensaios de laboratório seja pela determinação do volume de vazios por picnometria por hélio, por porosimetria por intrusão de mercúrio ou por saturação de água. Além destes, a porosidade também pode ser estimada por meio de análises de imagem obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

A porosidade normalmente é calculada no Brasil usando-se a ABNT NBR 9778:2008, em que é chamada de índice de vazios, obtida pela saturação em água de amostras de concreto. A determinação do tamanho dos poros é bastante complexa, e foi exemplificada por Alves (2002), quando realiza a caracterização e distribuição granulométrica de argamassas com aditivo incorporador de ar através da análise de imagens. Segundo Ollivier e Vichot (2008), duas grandezas físicas permitem caracterizar a aptidão dos concretos de resistir à entrada dos agentes agressivos: a permeabilidade e a difusão. A permeabilidade se caracteriza pelo transporte de matéria feito sob gradiente de pressão ao passo que a difusão é caracterizada pelo transporte sob gradiente de concentração, em escala molecular. O transporte de matéria através da rede porosa depende das condições de umidade do material.

### 4.3.2 Permeabilidade

Esta grandeza física trata-se de uma propriedade macroscópica dos materiais porosos que contêm uma porosidade interconectada. Na pasta de cimento hidratada, o fluxo de água se dá principalmente através dos poros e capilares interconectados, tendo ainda como influência as microfissuras e a interface entre a matriz e os agregados.

#### 4.3.2.1 Coeficiente de permeabilidade à água

A ABNT NBR 10786:1989, em seu item 3.1 expressa o coeficiente de permeabilidade como:

Um coeficiente que expressa a velocidade de percolação de água no concreto, definido a partir da Lei de Darcy, aplicável a fluxos de fluido viscoso, em meio poroso, em regime laminar e permanente com a vazão de água numa direção, submetida a gradiente de pressão que atravessa o concreto.

Onde  $k$  (coeficiente de permeabilidade) será calculado pela expressão com base da Lei de Darcy, expresso na Equação 1

$$K = \frac{Q \times L}{A \times H} \quad (1)$$

Onde,  $K$  é o coeficiente de permeabilidade, expresso em cm/s;  $Q$  é a vazão de entrada, expressa por  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $L$  é a altura do corpo de prova (cm);  $A$  é a área da seção transversal do corpo de prova ( $\text{cm}^2$ ); e  $H$  é a coluna d'água correspondente à pressão utilizada (cm).

#### 4.3.2.2 Coeficiente de permeabilidade aos gases

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade aos gases, pode-se utilizar segundo Da Silva (2011), a Lei de Hagen Poiseuille, expressa na Equação 2. Essa equação somente é válida para fluxos laminares.

$$K_g = \eta \times \frac{Q \times l}{t \times A} \times \frac{2 \times p}{(p_1^2 - p_2^2)} \quad (2)$$

Em que  $K_g$  é o coeficiente de permeabilidade ao gás ( $\text{m}^2$ );  $\eta$  é a viscosidade do gás ( $\text{Nxs/m}^2$ );  $Q$  é a vazão de gás ( $\text{m}^3$ ); que flui durante o tempo  $t$ ;  $t$  é o tempo (s);  $l$  é a espessura da seção penetrada (m);  $A$  é a área da penetração ( $\text{m}^2$ );  $p$  é a pressão local a que se mede  $Q$  ( $\text{N/m}^2$ );  $p_1$  é a pressão de entrada do gás; e  $p_2$  é a pressão de saída do gás; todas as unidades de pressão sendo aferidas em  $\text{N/m}^2$ .

#### 4.3.3 Difusão

A difusão é a transferência de massa por movimento aleatório de moléculas ou íons na solução dos poros das regiões com altas concentrações para regiões de baixas concentrações da substância que difunde (DA SILVA, 2011). A taxa de transferência de massa através da unidade de área de uma seção pode ser determinada pela equação 3.

$$F = \frac{d_m}{d_t} \times \frac{1}{A} \quad (3)$$

Essa taxa é proporcional ao gradiente de concentração  $d_c/d_x$  e ao coeficiente de difusão  $D$ . Essa relação pode ser expressa por meio da primeira lei de difusão de Fick (Equação 4) para um processo estacionário.

$$F = -D \times \frac{d_c}{d_x} \quad (4)$$

Em que  $F$  é o fluxo de massa ( $\text{g/cm}^2\text{xs}$ );  $m$  é a substância que flui (g);  $t$  é o tempo (s); e  $A$  é a área ( $\text{m}^2$ ).

#### 4.3.4 Absorção capilar

A capilaridade é um fenômeno em que a água é transportada no concreto através dos poros capilares, devido à sua tensão superficial. De acordo com Da Silva (2011), o transporte é influenciado, por uma parte, pela viscosidade, a densidade e a tensão superficial do líquido e por outra parte, pela estrutura dos poros e a energia superficial característica do sólido. Sabe-se também que o efeito da capilaridade é tanto maior quanto menores forem os poros da estrutura.

Na sucção capilar, o fluxo de água  $F$  em um sistema poroso é dado pela Lei de Darcy, modificada para fluxo não saturado de água, como mostra a equação 5.

$$F = - \frac{k_p}{\eta} \times \frac{dp_w}{dx} \quad (5)$$

Em que:  $F$  é o fluxo de água ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ );  $k_p$  é o coeficiente de permeabilidade de vapor ( $\text{kg/m}$ );  $\eta$  é a viscosidade da água ( $\text{Nxs/m}^2$ ); e  $dp_w/dx$  é o gradiente de pressão da água no poro  $p_w$  ( $\text{N/m}^2$ ).

### 4.4 CARBONATAÇÃO

A carbonatação é um processo químico que ocorre naturalmente no concreto ao longo dos anos. Diversos são os mecanismos envolvidos nesse processo, no entanto, a carbonatação difusa é em geral a mais importante.

#### 4.4.1 Visão geral sobre a carbonatação

Esse fenômeno químico se produz na superfície do concreto na presença de umidade, do gás carbônico presente na atmosfera e na presença do produto das reações de hidratação do cimento, principalmente o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Essa reação prossegue ao longo

dos anos, consumindo os álcalis, que se encontra nos poros do concreto, e o gás carbônico, para formar os carbonatos sendo o de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) um dos mais importantes.

Primeiramente a carbonatação depende da disposição dos poros e da quantidade de água retida, pois ambos os fatores determinam e influenciam a penetração do ar e o tipo de transporte que irá ocorrer, conforme discutido no item 4.3. Outros fatores que a influenciam são a umidade relativa do ar, que irá interferir em reações secundárias que influenciam a solubilidade do gás carbônico, e a quantidade de cal hidratada ou não hidratada na pasta.

Para obter-se condições ótimas que maximizem essa reação, a umidade do ambiente deve estar entre 50% e 70% (BAUER, 2013), pois a valores menores do que este pode facilitar as trocas gasosas, mas não se encontra em quantidades suficientes para promover a dissolução dos componentes. Por outro lado, se o concreto está saturado de água, não ocorrerá a carbonatação devido à ausência do  $\text{CO}_2$ . Assim, locais com o concreto submerso, não estarão susceptíveis à carbonatação, assim como locais quentes de clima árido.

O processo é similar para todos os álcalis. Para o  $\text{Ca(OH)}_2$ , o produto da reação, o carbonato de cálcio, é insolúvel e se deposita nos poros do concreto. A água liberada na reação pode não evaporar e continuar a dissolver o hidróxido de cálcio que ainda estiver presente na pasta ao redor, dando continuidade à reação. No entanto, a reação não continua infinitamente pois o carbonato de cálcio depositado nos poros dificulta a penetração do  $\text{CO}_2$  pelo ar, devido à sua obstrução dos mesmos. Assim, a reação progride cada vez mais lentamente, pois para continuar acontecendo, ela precisa da presença simultânea dos três fatores, que podem não mais estar presentes.

A camada mais superficial do concreto se carbonata rapidamente quando exposta ao ar, sendo a parte ainda não afetada pela reação localizada mais no interior da peça. A delimitação dessas duas zonas é chamada de frente de carbonatação, e a medida da profundidade da zona de carbonatação é feita medindo-se a espessura da camada carbonatada desde sua superfície até a frente de carbonatação. O período inicial da

carbonatação é chamado período de iniciação, período este em que a velocidade da reação ocorre mais rapidamente.

A profundidade carbonatada varia de um ponto para outro de acordo com a porosidade do concreto e aumenta com o tempo (BAUER, 2013), como pode ser vista na Figura 12, tendo sua velocidade de avanço diminuída de acordo com o tempo. Todos esses fatores como a heterogeneidade da pasta, imprevisibilidade da estrutura porosa e diferentes velocidades das reações de acordo com o avanço da frente de carbonatação, são características que desafiam os pesquisadores no equacionamento de modelos de previsão de durabilidade do concreto armado.

Figura 12 – Profundidade de carbonatação

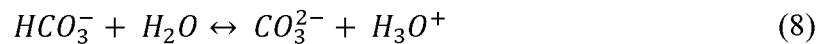
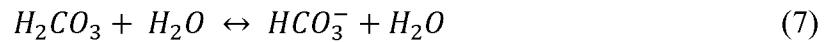


Fonte : Autor

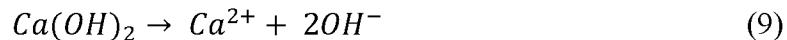
#### 4.4.2 Processos de carbonatação

Na presença de água ocorre uma reação química de carbonatação com a pasta de cimento hidratada. Essa reação transforma os álcalis produtos da hidratação em carbonatos. O processo principal é com o hidróxido de cálcio, de acordo com as seguintes Equações de 6 a 12 (OLLIVIER E VICHOT, 2008).

- a) Dissolução do CO<sub>2</sub> em água em etapas intermediárias mostradas nas equações 6 a 8:



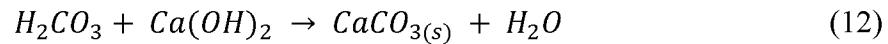
b) Dissolução da portlandita segundo as equações 9 e 10:



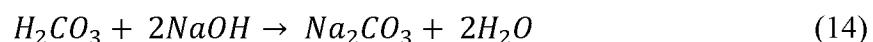
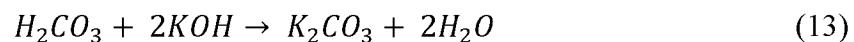
c) Reação do  $CO_3^{2-}$  com a portlandita dissolvida conforme equação 11:



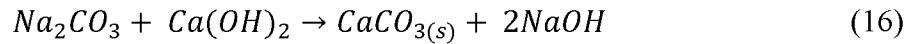
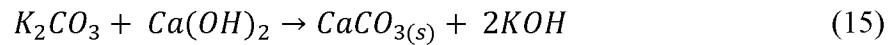
Resumidamente, a reação do ácido carbônico com a portlandita, após a dissolução da portlandita fica demonstrado na Equação 12.



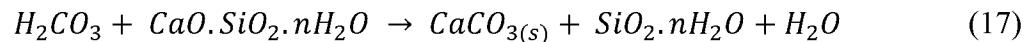
A consequência da carbonatação é a diminuição do PH de 12,5 a 13,5, devido à presença da portlandita, para valores abaixo de 9, em virtude da presença dos íons  $H_3O^+$ . Na presença de álcalis no concreto (NaOH e KOH), a solubilidade da cal é relativamente baixa, fazendo com que sua dissolução ocorra lentamente. Ainda assim, as próprias bases alcalinas também podem sofrer carbonatação, segundo as equações 13 e 14.



A carbonatação destas bases alcalinas aumenta a solubilidade da cal, que pode então carbonatar-se em maior quantidade com os carbonatos de sódio e de cálcio, segundo as equações 15 e 16.



Ademais, a carbonatação também altera outros compostos hidratados da pasta de cimento endurecida (silicatos e aluminatos) e assim, o C-S-H pode evoluir para um material amorfó do tipo gel de silício representado na Equação 12.



A portlandita é o composto que se carbonata mais rapidamente, porém, os outros compostos hidratados (aluminatos e silicatos de cálcio) são também sensíveis ao ataque do  $CO_2$ , produzindo igualmente a calcita.

Em seu livro, Ollivier e Vichot (2008), afirmam que, após a carbonatação, a porosidade do concreto diminui, pois os volumes molares dos produtos hidratados da reação de carbonatação são superiores aos dos produtos hidratados a partir dos quais eles foram formados. Além do mais, o carbonato de cálcio é um precipitado sólido que ocupa, portanto, uma parte dos vazios capilares iniciais.

A própria reação da carbonatação da portlandita libera água que estava combinada quimicamente e esta participa dos mecanismos de transporte no interior do material. Assim sendo, com a diminuição do volume dos poros e da amplitude do sistema de poros, a carbonatação diminui com o tempo à medida que os produtos precipitam-se e que ocorre a liberação da água preenchendo parcialmente os poros.

A velocidade da progressão da frente de carbonatação depende das características do material (porosidade, natureza do cimento, etc.) porém, a umidade relativa do ar, também

determina o teor de água do concreto sendo assim, fundamental como parâmetro de análise. Ollivier e Vichot (2008) afirmam que, para que a carbonatação seja máxima, a umidade relativa deve ser suficientemente baixa para que a fase gasosa conectada esteja presente, permitindo a rápida difusão do  $CO_2$  gasoso; e suficientemente alta para que a reação de carbonatação possa ocorrer na fase aquosa; sendo máxima para valores próximos de 65% e muito baixa (a valores inexpressivos) para valores abaixo de 40%.

A composição do concreto e as condições de execução da obra influenciam na carbonatação do concreto. Assim, Ollivier e Vichot (2008) mostram que:

- o aumento da relação a/c aumenta a profundidade de carbonatação e a taxa com que ela acontece;
- quanto maior for o consumo de cimento, menor a profundidade carbonatada para uma mesma relação a/c;
- a redução do tempo de cura aumenta a profundidade de carbonatação, exatamente por causa do controle do grau de hidratação dos produtos das reações.

Segundo Ollivier e Vichot (2008), à temperatura fixa, o número de camadas de moléculas de vapor de água adsorvidas sobre a superfície de um sólido inserido em ar úmido é função crescente da pressão parcial da água, ou seja, da umidade relativa.

#### 4.4.3 Consequências da carbonatação

Em um concreto simples pode-se dizer que a carbonatação tem um efeito favorável, pois aumenta sua resistência superficial, devido à sua nova estrutura física mais compacta. Ele se torna também mais impermeável, pois segundo Bauer (2013), essa estrutura carbonatada na superfície forma uma barreira natural contra a penetração de gases e líquidos.

Em contrapartida, para o concreto armado, não se pode afirmar que os efeitos são positivos. A proteção básica do concreto às armaduras é feita pelo ferrato de cálcio formado pela combinação de ferrugem superficial da barra  $Fe(OH)_3$ , com o hidróxido de cálcio  $Ca(OH)_2$  (BAUER, 2013). Essa proteção, somente age enquanto o meio estiver básico. Assim, a partir do momento em que a carbonatação consome os produtos que tornam o meio básico,

o pH do meio cai para valores inferiores a 9, e a partir desse momento, a armadura está sujeita a sofrer corrosão. O óxido que se forma como produto da corrosão do aço tem volume de 6 a 8 vezes maior que o aço original, e esse aumento provoca fissuras no concreto, por onde os agentes agressivos podem penetrar, havendo maior aumento do óxido, que leva à ruptura do concreto e exposição das armaduras. O processo pode levar à perda de aderência e à resistência da peça, devido à contínua diminuição da seção resistente do aço.

Sendo um material considerado já fissurado, o concreto na presença de fissuras tem uma entrada preferencial de ar, e consequentemente uma superfície sujeita à carbonatação. Essas fissuras podem ser das mais diversas origens, como por exemplo retração hidráulica, variação térmica, calor de hidratação, cura deficiente, entre outros. A fissura aberta que atinge a armadura é, por ela mesma, um fator de risco para a ocorrência da corrosão das armaduras. No entanto, para fissuras que não atingem diretamente as armaduras, mas que a sua frente de carbonatação possam as atingir, podem sujeitar as armaduras à possibilidade de corrosão.

No caso das paredes de concreto das habitações de interesse social de um pavimento, a armadura não exerce uma função preponderante na resistência porém a sua corrosão poderá afetar a estética da edificação. Podem ocorrer manchas devido aos óxidos de ferro ou destacamento do concreto de cobrimento. Assim, a carbonatação deve ser um dos mecanismos de deterioração que deve ser considerado no projeto.

## 4.5 ATAQUE ÁCIDO

Por ser um material alcalino, o concreto quando submetido a um ambiente com ácido ou devido a uma reação química, sofre alterações em sua estrutura que influencia suas propriedades físicas, químicas, durabilidade e está sujeito ao aparecimento de patologias.

O processo de hidratação do cimento resulta em um pH entre 12,5 – 13,5 da solução aquosa dos poros. Os produtos de hidratação ao entrarem em contato com ambientes susceptíveis à

presença de ácidos como: tubulações de esgoto industriais e/ou orgânicos que são susceptíveis a sulfatos; pisos de criação de animais; chuva ácida, entre outros; resultam em instabilidade química da pasta e tende a se desintegrar (BEDDOE, 2016).

Nos solos, podem ser encontradas águas ácidas naturais, principalmente em regiões pantanosas ou úmidas, onde se encontra grande decomposição de matéria orgânica. A acidez destas águas naturais se deve à presença de anidrido carbônico ( $\text{CO}_2$ ) dissolvido, encontrado em grande quantidade em águas minerais, águas do mar e águas subterrâneas (com presença de decomposição de material vegetal e animal).

As águas ácidas também são encontradas em regiões próximas a solos de aterros ou em lugares onde há armazenamento de resíduos de minérios. Lugares onde existam resíduos agrícolas e industriais, provenientes principalmente da indústria alimentícia ou de processamento de animais, podem gerar condições altamente ácidas. Assim como a utilização contínua de produtos de limpeza com ácidos diluídos.

Conforme Helene (2005), quando a água ácida entra no concreto, pode haver dois tipos de consequências. Se os sais formados forem insolúveis e expansivos, o concreto pode vir a se deteriorar. Caso os produtos formados forem solúveis, a porosidade do concreto pode aumentar gradualmente quando esses produtos forem lixiviados, acelerando o processo de desgaste do material. A Figura 13 mostra um esquema dos produtos dessas reações entre ácidos e o concreto.

Figura 13 – Formação de sais solúveis e insolúveis no concreto



Fonte: adaptado de Helene (2005).

Bauer (2013) mostra que a nocividade dos ácidos varia com a sua força, sendo que, os ácidos mais fortes (clorídrico, nítrico, sulfúrico) colocam em solução todos os constituintes do cimento com formação de sais de cálcio, alumínio e ferro; já os ácidos mais fracos, como por exemplo o ácido carbônico, não podem formar sais senão com a cal, mas não com a alumina e o óxido de ferro, de sorte que os hidróxidos de ferro e de alumínio subsistem. Helene (2005) propôs uma classificação, demonstrada na Tabela 5 onde exemplifica quais ácidos que formam sais solúveis e insolúveis.

Tabela 5 – Formação de sais solúveis e insolúveis para cada tipo de ácido

Ácidos agressivos que formam sais de cálcio solúveis	Fórmula química	Ocorrência
Ácido clorídrico	HCl	Indústria química
Ácido nítrico	HNO <sub>3</sub>	Indústria de fertilizantes
Ácido acético	CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> H	Processos de fermentação
Ácido fórmico	H.CO <sub>2</sub> H	Indústria de alimentos e pigmentos
Ácido láctico	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (OH)CO <sub>2</sub> H	Indústria de laticínios
Ácido tântico	C <sub>76</sub> H <sub>52</sub> O <sub>46</sub>	Indústria do tanino, águas pantanosas
Ácidos agressivos que formam sais de cálcio insolúveis	Fórmula química	Ocorrência
Ácido fosfórico	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Indústria de fertilizantes
Ácido tartárico	(CH(OH).CO <sub>2</sub> H) <sub>2</sub>	Indústria vitivinícola

Fonte: adaptado de Helene (2005)

A resistência ao ataque químico de materiais a base de cimento é determinada principalmente por sua permeabilidade, pela alcalinidade e pela composição química da pasta de cimento. A degradação da pasta de cimento é induzida por uma combinação de efeitos de transporte difusivo e reações químicas. As cinéticas de degradação na pasta dependem de cada um destes dois fenômenos (FALCON *et al.* 1998).

A degradação de materiais a base de cimento por ataque ácido é causada pela reação do ácido com os produtos de hidratação do cimento, que formam sais solúveis de cálcio. A perda de massa é causada pela dissolução destes produtos solúveis. O ataque ácido começa na superfície, aprofundando-se a uma extensão muito maior à medida que reage com a matriz cimentícia desestabilizando-a e tornando-a mais porosa. Entretanto, fatores como o

tipo de cimento, tipo e a concentração do ácido, idade de cura e o tempo de exposição ao ácido podem influenciar os processos químicos envolvidos (BEDDOE, 2016).

Não está disponível na normalização brasileira um método padronizado para execução de ataque ácido em concreto e/ou argamassa de cimento Portland, assim, o procedimento do ensaio para identificação do ataque ácido, consiste em determinar a massa do corpo de prova inicial, submeter o mesmo a uma solução ácida durante um período de tempo determinado e por fim verificar a perda da massa do mesmo.

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que o ácido acético ( $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$ ) é muito agressivo a produtos cimentícios e pode ser resultado de fermentação aeróbica e anaeróbica (CHATVEERA, LERTWATTANARUK, 2014), tendo assim diversas origens e aplicabilidades. Outrossim, por ser de fácil controle e apresentar influência no concreto caso tenha contato, foi escolhido trabalhar com o mesmo para determinação da perda de massa do concreto.

O mecanismo de degradação da pasta devido a este ácido começa com a separação dos íons hidroxila ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) e acetato ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ) em solução aquosa de acordo com a Eq. 18 e sua permeabilidade através dos poros capilares (CHATVEERA, LERTWATTANARUK, 2014). Quando a reserva alcalina cai para um pH menor que 12, o hidróxido de cálcio contribui para conectar poros capilares permitindo que os íons ácidos penetrem mais profundamente. Igualmente, a baixa alcalinidade causa desintegração dos silicatos de cálcio e aumenta o tamanho dos poros (HEWLETT, 2006).



Os empreendimentos para habitações de interesse social, devido à necessidade de grandes áreas, geralmente são em zona rural que são incorporadas à zona urbana, próximos à zona industrial, daí a possibilidade de ataque ácido. Também a chuva ácida pode degradar a camada superficial do concreto, daí a necessidade de manutenção da superfície externa das paredes de concretos.

# CAPÍTULO 5

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 5.1 METODOLOGIA

Em conformidade com os objetivos propostos nesta pesquisa implementou-se a metodologia baseada em ensaios laboratoriais com corpos de prova de concreto e protótipos de paredes de concreto. Os experimentos foram conduzidos em ambiente controlado obedecendo-se as normalizações brasileiras.

Este delineamento experimental visa determinar a influência da variação do teor de ar incorporado em propriedades que influenciam a durabilidade das estruturas, tais como a carbonatação, o ataque ácido, absorção por capilaridade e sob fervura, assim como estanqueidade dos protótipos de paredes de concreto.

Para tanto, a metodologia proposta para o procedimento experimental consistiu na confecção de corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para os ensaios de carbonatação acelerada, resistência à compressão, ataque ácido, absorção capilar e absorção sob fervura e protótipos com um compartimento de edificações para os ensaios de estanqueidade.

Os experimentos realizados fazem parte do escopo do Projeto de Pesquisa “Concreto com Ar Incorporado” do grupo da FECIV-UFU. Outros experimentos foram realizados por Cintra (2015) e Magalhães (2017).

## 5.2 ESTIMATIVA ESTATÍSTICA DO NÚMERO DE ENSAIOS

Para que os resultados obtidos de ensaios experimentais possam ser analisados por meio de métodos estatísticos, possibilitando elaborar-se conclusões objetivas, o planejamento experimental foi baseado numa metodologia também estatística, para que se possa avaliar como os erros experimentais afetam os resultados.

Sabe-se que qualquer procedimento experimental sofre influência direta de equipamentos, instrumentos e materiais. No entanto, outros fatores que podem influenciar estatisticamente são as condições de ensaios e o número de ensaios feitos para uma mesma categoria. Nesse quesito, calcula-se o número necessário de réplicas, que consiste na repetição de um mesmo ensaio, sob condições preestabelecidas, com corpos de prova com mesmas características.

Para o cálculo da quantidade de réplicas utilizou-se o critério de T de Student para se estimar o tamanho da amostra de uma população com variância desconhecida, segundo a Equação 18.

$$n = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{E} \right)^2 \quad (19)$$

Onde  $n$  é o número de réplicas,  $Z_{\alpha/2}$  é a variável aleatória com distribuição normal de T Student para o nível de confiança estimado,  $\sigma$  é a variância, e  $E$  é o erro atribuído ao intervalo de confiança. Para que a análise estatística siga os critérios de uma distribuição normal, os resultados obtidos devem possuir um erro que não excederá o valor especificado  $E$ , quando o tamanho da amostra for igual ou maior que o especificado pela a Equação 19.

Devido ao critério da curva normal foi estabelecido o nível de confiança de 95% para todos os resultados. Assim, o valor de  $E$  foi 5%, e o valor de  $Z_{0,05/2} = Z_{0,025}$ , pela tabela de T de Student, foi 1,96, para infinitos graus de liberdade. Como estimativa para usos em laboratório, onde tem-se alto nível de controle, usa-se também o valor de 4 para a variância. Assim, tem-se o resultado a seguir aplicando estes valores à Equação 19.

$$n = \left( \frac{Z_{0,025} \times \sigma}{E (\%)} \right)^2 = \left( \frac{1,96 \times 4}{5} \right)^2 = 2,46$$

Foram obtidos 3 corpos de prova para cada tipo de ensaio e teor de aditivo, para que o erro seja considerado inferior a 5%. Para fins experimentais, tomando-se por precaução a perda de algum corpo de prova por defeito dos materiais, ou pela invalidação de algum resultado devido ao acaso, adotou-se o valor de 4 corpos de prova para cada ensaio.

A verificação da quantidade de réplicas foi feita conforme GOMES (1990), pelo método da análise da variância. Este método considera aceitável o erro quando o número de graus de liberdade é superior a 11. Considerando-se 3 níveis de aditivo e 4 réplicas, tem-se o erro da seguinte forma:

- ❖ Tratamentos (3 níveis de aditivo com dois tipos de cura cada):  $6 - 1 = 5$  graus de liberdade;
- ❖ Total de unidades amostrais =  $6$  (níveis de aditivo)  $\times$   $4$  (repetições) =  $24$  graus de liberdade;
- ❖ Erro:  $24 - 5 = 19$ ,

Os resultados se encontram resumidamente ilustrados na Tabela 6, conforme modelo proposto por Gomes (1990).

Tabela 6 – Análise da variância para cálculo da quantidade de amostras

<b>Causa da variância</b>	<b>GL ( Graus de liberdade)</b>
Tratamentos	5
Resíduo ou Erro	19
Total	24

Fonte: Autor

Como o número de graus de liberdade do erro foi maior que o recomendado, conclui-se que 4 repetições são satisfatórias para os ensaios, considerando-se 3 níveis de aditivos, cada um com dois tipos de cura diferentes.

### **5.3 MATERIAIS**

Para realização destes experimentos, foi utilizado um concreto usinado com resistência à compressão de 20 MPa, com abatimento de  $230 \pm 30$  mm como referência e teor de ar aprisionado de até 2,0%. Assim foram realizadas três concretagens com três porcentagens de teor de aditivo incorporador de ar sendo 0,0%; 0,5% e 1,0%.

#### **5.3.1 Especificação dos materiais**

Para produção do concreto com aditivo incorporador de ar foram utilizados os seguintes materiais constituintes:

Cimento Portland CP V-ARI – cimento portland de alta resistência inicial, normalizado pela ABNT NBR 5733:1999, com consumo de 320 kg/m<sup>3</sup>;

Agregados – foi utilizada como agregado miúdo areia natural de granulometria média e pó de brita com consumos de, respectivamente 520 kg/m<sup>3</sup> e 570 kg/m<sup>3</sup>; e como agregado graúdo a brita 0, que é um agregado de origem basáltica com dimensão máxima característica de 12,5 mm, de acordo com a ABNT NBR 7211:2009, com consumo de 820 kg/m<sup>3</sup>;

Aditivo químico – O aditivo foi o Micro Air da empresa Basf, que segundo o produtor, é um líquido de cor avermelhada à base de resinas sintéticas, livre de cloretos, de pH entre 10 e 12, e densidade próxima à da água (1,010-1,050). A dosagem recomendada pelo fabricante é de 0,05 a 1,0% sobre massa de cimento, sendo que esta dosagem pode variar de acordo com a quantidade de ar incorporado, tipo de cimento, quantidade de finos na mistura, fator a/c e tipos de agregados.

Ademais, tem-se outros dados como consumo de água de 200 l/m<sup>3</sup>; consumo de fibra de polipropileno de 30 g/m<sup>3</sup> e consumo de aditivo plastificante de 2,7 l/m<sup>3</sup>. Assim, o traço geral foi de 1:1,62:1,78:2,56:0,625. Um resumo das características dos materiais, fornecido pela usina do concreto se encontra na Tabela 7.

Tabela 7 – Características e materiais usados na fabricação do concreto

Materiais	Características	Consumo	Traço em massa
<b>Aglomerante</b>	Cimento CP V	320	1
<b>Agregado miúdo</b>	Pó de brita e areia natural de rio	570+520	3,4
<b>Agregado Graúdo</b>	Brita Basáltica	820	2,56
<b>Fibra de polipropileno</b>		0,03	
<b>Aditivo Superplastificante</b>		2,7	
<b>Água</b>	Rede pública de abastecimento	200	0,625
<b>Aditivo Incorporador de Ar</b>	Micro Air		
<b>Resistência à compressão</b>	20 MPa		
<b>Abatimento de tronco de cone</b>	200±30 mm		

Fonte: Magalhães (2016)

### 5.3.2 Cálculo da quantidade de material necessário

Para os ensaios nos quais foram usados corpos de prova cilíndricos de 10 cm × 20 cm, tem-se 3 teores de aditivos com dois tipos de cura e três ensaios, sendo eles absorção capilar e sob fervura, carbonatação acelerada e ataque ácido, com 4 réplicas cada. Ademais, foram adotados um exemplar com dois corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão, aos 7, 14 e outro exemplar para ser rompido aos 28 dias. A Tabela 8 resume o quantitativo de corpos de prova 10 cm × 20 cm para os referidos ensaios, para cada teor de ar incorporado.

Ademais, devido às condições usuais nas obras citadas de não realizar-se a cura submersa, optou-se por um comparativo dessas propriedades mediante duplicação dos ensaios com corpos de prova curados ao ar (AR) e sob cura submersa de 28 dias (U). Assim, tem-se uma visão geral de como este concreto aditivado se comporta submetidos às duas condições de cura.

Tabela 8 – Resumo de quantidade de corpos de prova 10 cm × 20 cm

Teor de Aditivo	Abs. Capilar	Carbonatação	Ataque ácido	Resistência (7d)	Resistência (14d)	Resistência (28d)
<b>0.0% AR</b>	4	4	4	-	-	-
<b>0.0% U</b>	4	4	4	2	2	2
<b>0.5% AR</b>	4	4	4	-	-	-
<b>0.5% U</b>	4	4	4	2	2	2
<b>1.0% AR</b>	4	4	4	-	-	-
<b>1.0% U</b>	4	4	4	2	2	2
<b>TOTAL</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>

Fonte: Autor

Para os ensaios de estanqueidade foram utilizados 3 protótipos de 3 m × 3 m (medidas em planta) com 2,72 m de altura, que reproduzem um comportamento das habitações de interesse social que foram construídas em um residencial com o sistema construtivo de paredes de concreto. Esses protótipos substituem as placas necessárias para realização do ensaio da ABNT NBR 15575-4:2013, que especifica placas de medidas mínimas de 105 cm × 135 cm com sua espessura comumente utilizada de 10 cm.

## 5.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O concreto a ser utilizado foi usinado, fornecido sem a adição do aditivo incorporador de ar, ao qual foi adicionado, antes da aplicação, nos teores especificados. Foram confeccionados três tipos de concreto, variando o teor de aditivo incorporador de ar em 0,0%, 0,5% e 1% sobre o peso de cimento.

O concreto foi fornecido em caminhões betoneira com volume de 5 m<sup>3</sup>, sendo um caminhão para cada protótipo e os corpos de prova referentes ao teor de aditivo IAR.

Foram moldados protótipos com um compartimento das habitações de interesse social que estão sendo executadas na cidade, em dimensões de 3 m × 3 m em planta, altura de 2,72 m e espessura de parede de 10 cm (Figura 14 – Visão 3D dos protótipos. Os protótipos foram executados com a mesma técnica construtiva utilizada na construção do residencial, a fim de reproduzir as condições da obra em laboratório. Neles foram feitos os ensaios de estanqueidade.

Figura 14 – Visão 3D dos protótipos



Fonte: Magalhães (2016)

A moldagem foi executada em 3 protótipos, um para cada teor de ar incorporado, em que seguiram as etapas construtivas de execução de radier (Figura 15), seguido de montagem das formas metálicas (Figura 16) com parafusos sextavados 12 mm × 50 mm, tela nervurada soldada de 0,61 cm<sup>2</sup>/m (nervuras espaçadas de 15 cm em 15cm) e travamentos transversais de formas em faquetas de chapas de aço carbono 20 cm × 3 cm × 0,31 cm conforme esquema representado na Figura 17b.

Figura 15 – Radiers dos quatro protótipos



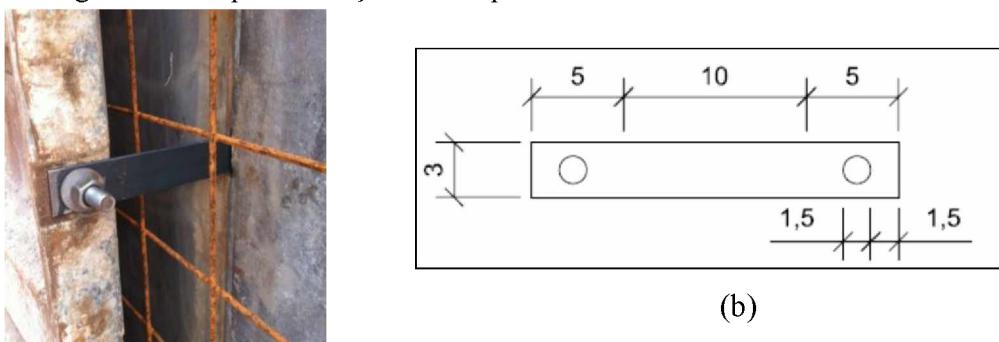
Fonte: Autor

Figura 16 – Formas metálicas



Fonte: Autor

Figura 17 – Faquetas de aço carbono para travamento transversal de formas



(a)

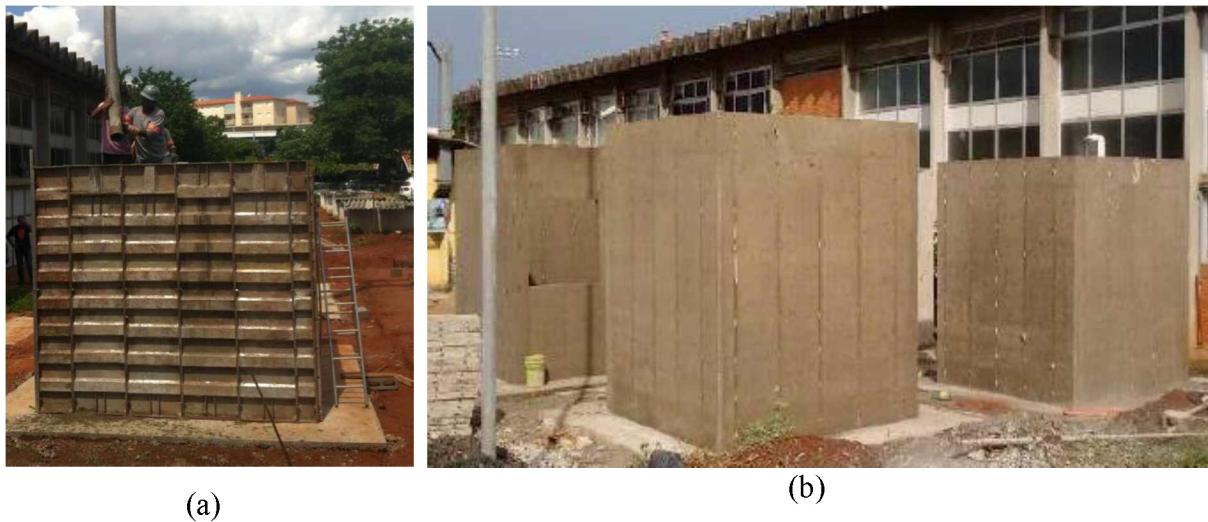
(b)

Fonte: Autor

As chapas de travamento transversal das formas mostradas na Figura 17, foram envolvidas por uma manta de poliestireno expandido para permitir a retirada e reaproveitamento das

mesmas. Cada um foi concretado com bomba (Figura 18) devido à acessibilidade do caminhão no canteiro. No momento da concretagem de cada um deles foi moldada a quantidade necessária de corpos de prova para realização dos outros ensaios.

Figura 18 – Concretagem dos protótipos (a) e protótipos finalizados (b)



Fonte: Autor

## 5.5 ENSAIOS

### 5.5.1 Ensaios no estado fresco

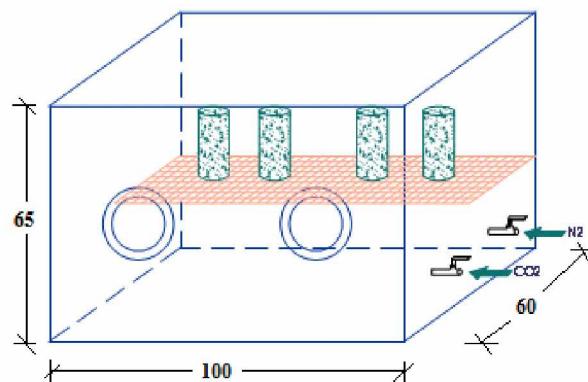
Os ensaios no estado fresco, feitos no momento da entrega do concreto no local, foram a determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone, de acordo com a ABNT NBR NM 67:2008, determinação do teor de ar e massa específica segundo o método pressométrico especificado na ABNT NBR NM 47:2002.

### 5.5.2 Ensaio de carbonatação acelerada

O ensaio de carbonatação foi feito na Câmara de Carbonatação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. Esta câmara é uma caixa de dimensões 100 cm × 60 cm × 65 cm (comprimento × profundidade × altura) como mostrado no esquema da Figura 19, vedada para aprisionar CO<sub>2</sub> em altas concentrações; suas faces foram feitas em

chapas de acrílico de 10 mm de espessura que, após serem niveladas, foram conectadas umas às outras por parafusos e cola especial para acrílico (SALOMÃO, 2006).

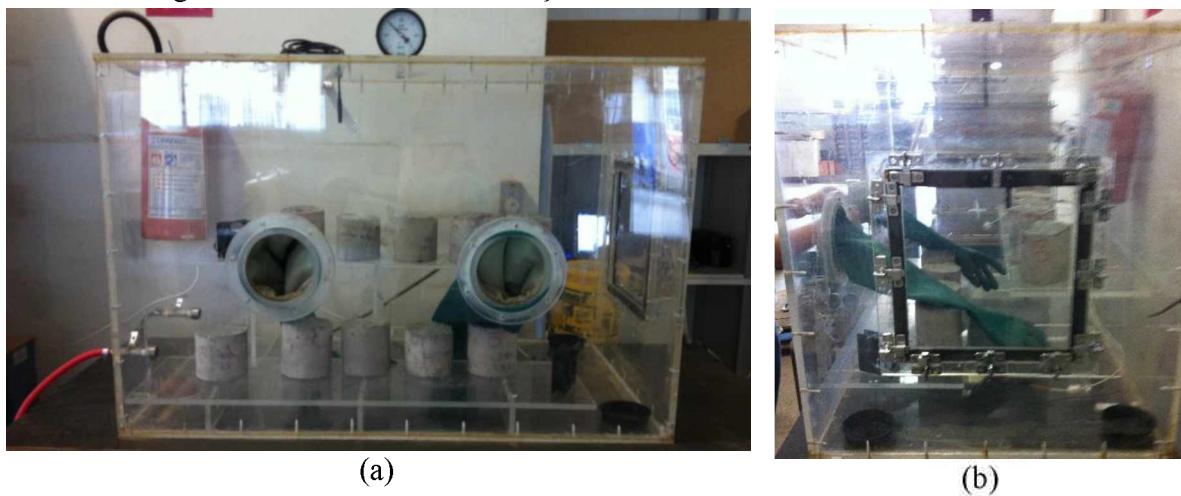
Figura 19 – Esquema da câmara de carbonatação



Fonte: adaptado de Salomão (2006)

A inserção dos corpos de prova é feita por meio de uma tampa lateral da câmara, feita com tranquetas cromadas e vedação de guarnição esponjosa. Para manusear os espécimes no interior da câmara, há um par de luvas de cano longo, na face frontal da caixa, mostradas na Figura 20, assim como o circulador de ar.

Figura 20 – Câmara de carbonatação – Universidade Federal de Uberlândia.



Fonte : Autor

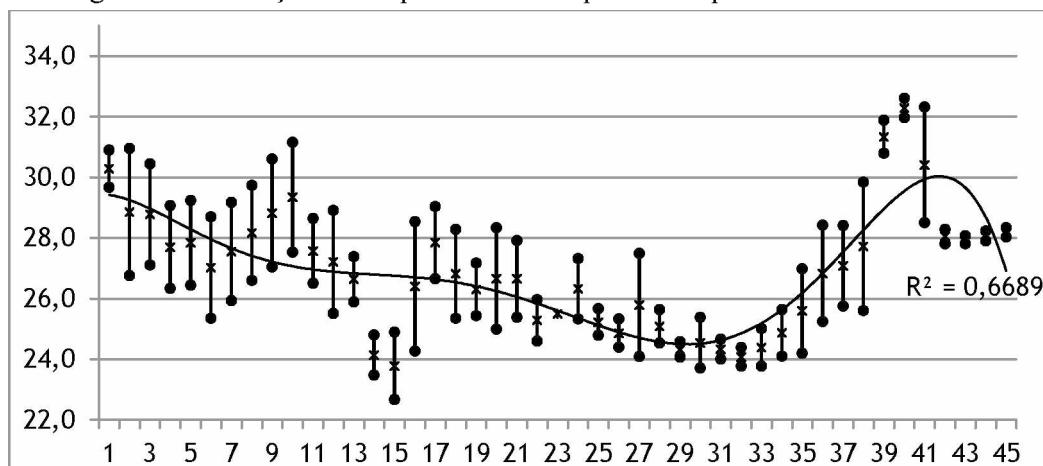
A câmara foi projetada com uma entrada de gás carbônico, e uma saída para vácuo, além de um manovacuômetro para se aferir a pressão no interior da câmara (Figura 20). A utilização

do aparelho requer então, um cilindro de CO<sub>2</sub> e uma bomba de vácuo onde a conexão é feita com válvulas de rótula inoxidáveis. A câmara foi projetada para operar com o preenchimento total de CO<sub>2</sub>, para tanto, é necessária a retirada total de ar, promovendo-se a sua substituição por nitrogênio que não afeta o concreto e posterior introdução do CO<sub>2</sub>. O sistema de aquisição dos dados de temperatura e umidade são feitos por meio de um sensor presente na parte superior da câmara ligado ao aquisitor de dados.

Salomão (2006) verificou a incidência de maior carbonatação nos corpos de prova situados na parte inferior da câmara devido à maior densidade do gás carbônico e nas proximidades da injeção do gás. Para correção deste problema foram inseridos quatro *coolers* nas extremidades internas da câmara para manter a circulação do ar e impedir que a densidade do gás carbônico altere os resultados de carbonatação, provocando maior carbonatação na parte inferior dos corpos de prova.

Em testes prévios realizados com o concreto referência, verificou-se uma alta variação de temperatura ao longo dos 60 dias de ensaio, mostrada na Figura 21 onde pode-se observar a faixa de variação diária de temperatura assim como ao longo dos primeiros 45 dias de ensaio. A variação de temperatura afeta direta e indiretamente o bom andamento do ensaio: direta pois não fornece as condições ideais para aumento da carbonatação e indiretamente pois varia também a umidade, uma vez que ambas variáveis são interdependentes.

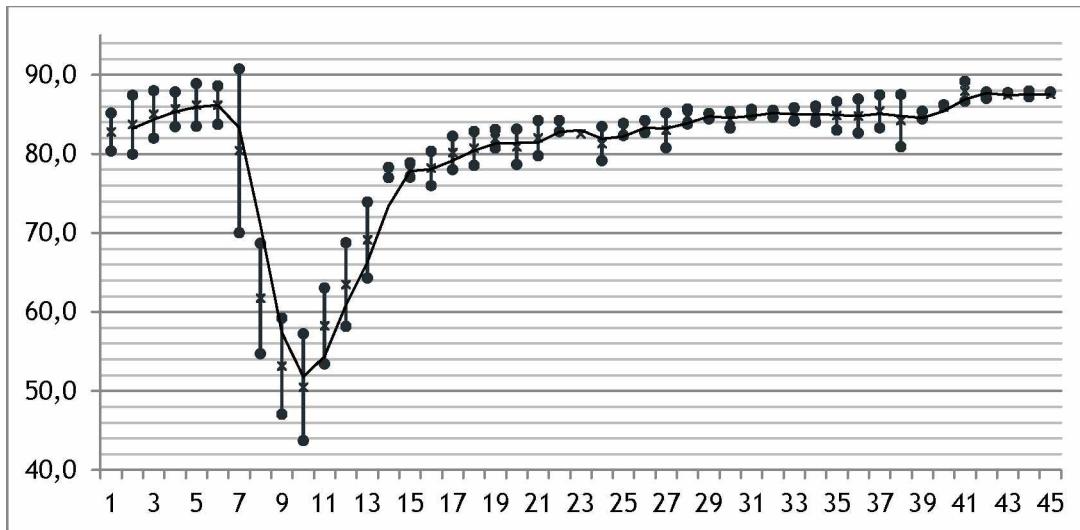
Figura 21 – Variação da temperatura em °C para os 45 primeiros dias de ensaio



Fonte: Autor

A variação da umidade também encontra-se representada na Figura 22, onde nota-se a variabilidade deste parâmetro e a dificuldade de controle para que este fique na faixa ótima de 50% a 70%. Para obter-se um maior controle desses dois parâmetros, a câmara foi movida para um local climatizado onde se controla a temperatura e umidade externa à mesma.

Figura 22 – Variação de Umidade (%) para os primeiros 45 dias de ensaio.



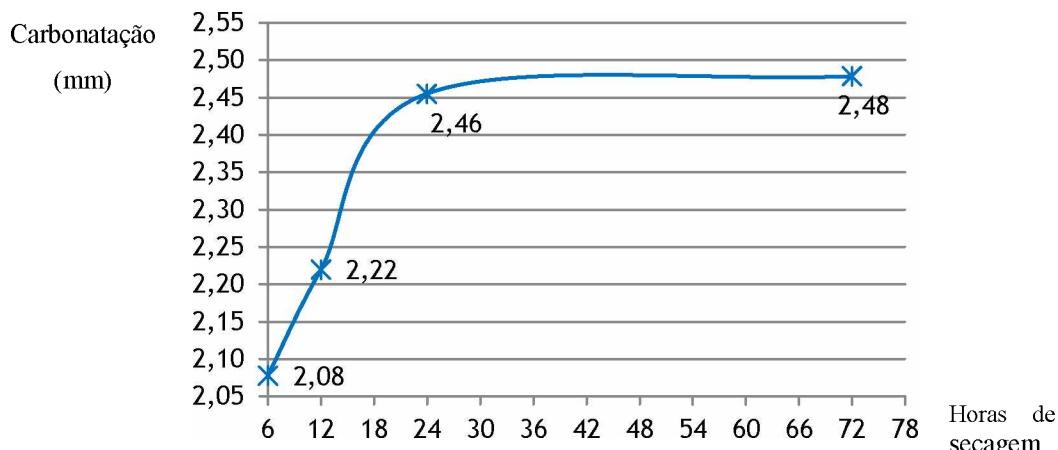
Fonte: Autor

A realização deste ensaio prévio teve por finalidade a determinação do procedimento experimental que seria adotado para os ensaios definitivos. Assim, foram feitos grupos de 4 corpos de prova, variando-se o tempo de secagem dos mesmos em estufa a  $(105 \pm 5) \pm 5^\circ\text{C}$ , após 28 dias de cura submersa, para determinação de qual a influência que este parâmetro teria, juntamente com a umidade remanescente no próprio corpo de prova, para aumento dos resultados de carbonatação.

Cada grupo passou, respectivamente, por 6 horas de secagem, 12h, 24h e o último foi seco até a sua estabilidade de massa, normalmente atingida com 72 h de secagem. Notou-se uma tendência de aumento das profundidades médias de carbonatação em relação ao tempo de secagem, demonstrado pela curva da Figura 23. Assim sendo, definiu-se que todos os corpos de prova a serem ensaiados a carbonatação seriam secos à estabilidade de massa pois a presença de umidade superficial poderia dificultar a difusão do  $\text{CO}_2$  para o interior

do concreto e retardar a velocidade da reação. Embora a própria reação química tenha a liberação de água que aumenta a umidade interna da câmara.

Figura 23 – Profundidade de carbonatação (mm) em relação ao tempo de secagem



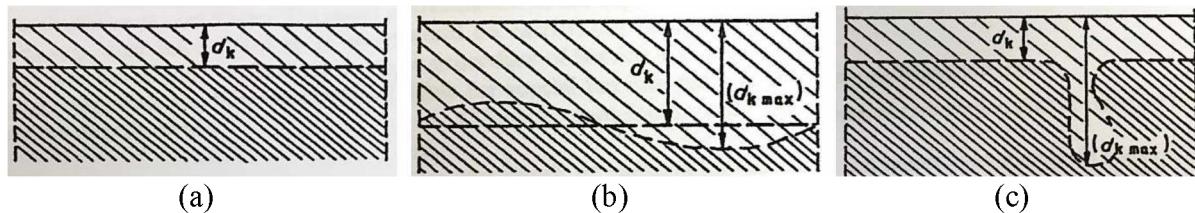
Fonte: Autor

Para os ensaios definitivos, os corpos de prova permaneceram na câmara por 90 dias, para enfim serem retirados e divididos em quatro partes para obtenção das leituras de profundidade de carbonatação. Foram rompidos primeiramente segundo a direção diametral e em seguida em duas partes, tendo assim, um total de 4 quartos de corpo de prova. Este procedimento é adotado para que se tenha mais leituras de um mesmo corpo de prova, a fim de diminuir os efeitos locais diretamente influenciados pela heterogeneidade da microestrutura da pasta.

A metodologia de medição seguida para este ensaio foi a proposta por Rilem (1988), em que a superfície deve ser borrifada com uma solução de fenolftaleína a 1% de concentração em álcool 70% (RILEM, 1988), após ser previamente limpa da poeira. A solução demonstra presença de pH acima de 9 indicando em vermelho o concreto não carbonatado. Segundo o mesmo autor, a medida de profundidade de carbonatação é influenciada pelo tempo após a aplicação do indicador químico devendo portanto, ser feita imediatamente após a sua aplicação para maior clareza da margem entre a frente carbonatada e não carbonatada.

Por fim, a espessura da frente carbonatada foi medida manualmente utilizando-se um paquímetro sempre perpendicularmente à superfície a fim de evitar erros de medida. De acordo com Rilem (1988), quando a frente carbonatada tem a característica uniforme como na Figura 24(a), a medida da profundidade de carbonatação é  $d_k$ . Quando a carbonatação se apresenta como na Figura 24(b), a média  $d_k$  e a profundidade máxima  $d_{k\max}$  devem ser aferidas e caso a carbonatação se mostre uniformemente com locais isolados de grande profundidade, como na Figura 24(c), ambas as medidas devem ser aferidas no entanto, a profundidade máxima não entra nos cálculos de profundidade média. Ainda segundo o mesmo autor, no entorno de agregados de grande dimensão a carbonatação deve ser medida somente na superfície do espécime e somente na pasta e valores abaixo de 0,5 mm não devem ser levados em consideração

Figura 24 – Metodologia de definição de profundidade de carbonatação



Fonte: Adaptado de Rilem (1988)

### 5.5.3 Ensaio de ataque ácido

A metodologia é baseada na perda de massa devido ao ataque ácido. O ensaio baseia-se em estudos semelhantes como de Kulakowski *et al.* (1997); Cassal (2000), Gorninski (2002) e Chatveera e Lertwattanaruk (2014) que, apesar de trabalhar com materiais diferentes apresentam metodologia semelhante. A concentração de ácido para as soluções utilizadas por estes autores foi de 5%, sendo adotada esta mesma concentração para realização do ensaio como ácido acético.

Após a moldagem de quatro corpos de provas de cada teor de aditivo e para cada tipo de cura, após os 28 dias de ganho de resistência foram cortados ao meio (Figura 25) para que somente a parte inferior fosse submetida ao ensaio, eliminando-se os riscos de exsudação

superficial, em seguida colocados na estufa à temperatura de  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ , onde permaneceram até a sua estabilidade de massa. Após este prazo, foram retirados da estufa e permaneceram em temperatura ambiente por 5 horas para que pudessem ser submersos na solução ácida.

Figura 25 – Marcação e corte dos corpos de prova



(a)

(b)

Fonte: Autor

A submersão total no ácido (Figura 26(b)) foi preferida em detrimento da exemplificada na Figura 26(a), utilizada em testes prévios com bêqueres de 1 litro contendo a solução ácida somente até a metade do corpo de prova. Isso se deve à formação de cristais de acetato de cálcio, produto da reação ácida, em alturas variáveis acima da altura da imersão do corpo de prova, que dificultava a aferição da perda de massa do corpo de prova ao final do tempo de ensaio.

Figura 26 – Corpos de prova parcialmente (a) e completamente imersos (b) em solução ácida



(a)

(b)

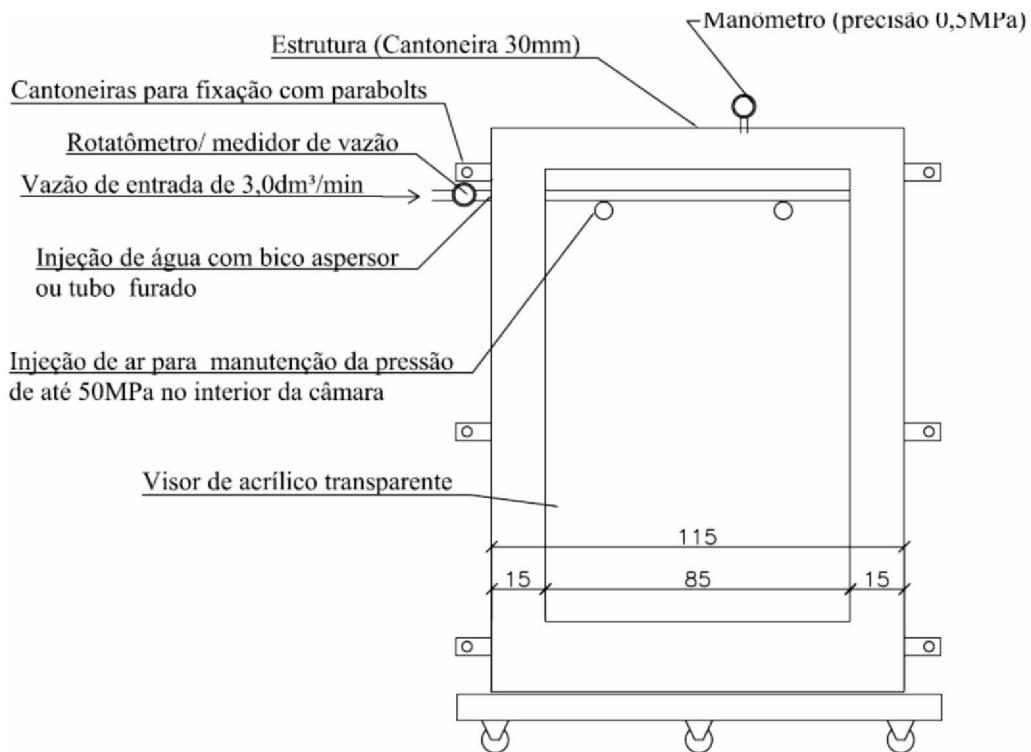
Fonte: Autor

Os corpos de prova permaneceram então, por 60 dias submersos em solução ácida a 5%, para serem, ao final do ensaio, levados à estufa à  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  até sua estabilidade de massa, e em seguida ser aferida a perda porcentual de massa.

#### 5.5.4 Ensaio de estanqueidade

O ensaio de estanqueidade foi feito em faces externas de paredes externas de SVVE com a utilização do aparato do Anexo C da ABNT NBR 15575-4:2013. Este ensaio consiste em submeter, durante 7 horas, a face externa da parede a uma vazão de água, sob a forma de uma película homogênea e contínua, com a aplicação simultânea de uma pressão pneumática sobre essa face. O corpo de prova ou painel, deve ter uma área de dimensões mínimas de 105 cm  $\times$  135 cm e para tanto foram feitos nos protótipos de um compartimento das casas.

Figura 27 – Esquema de dispositivos para ensaio de estanqueidade – Vista Frontal

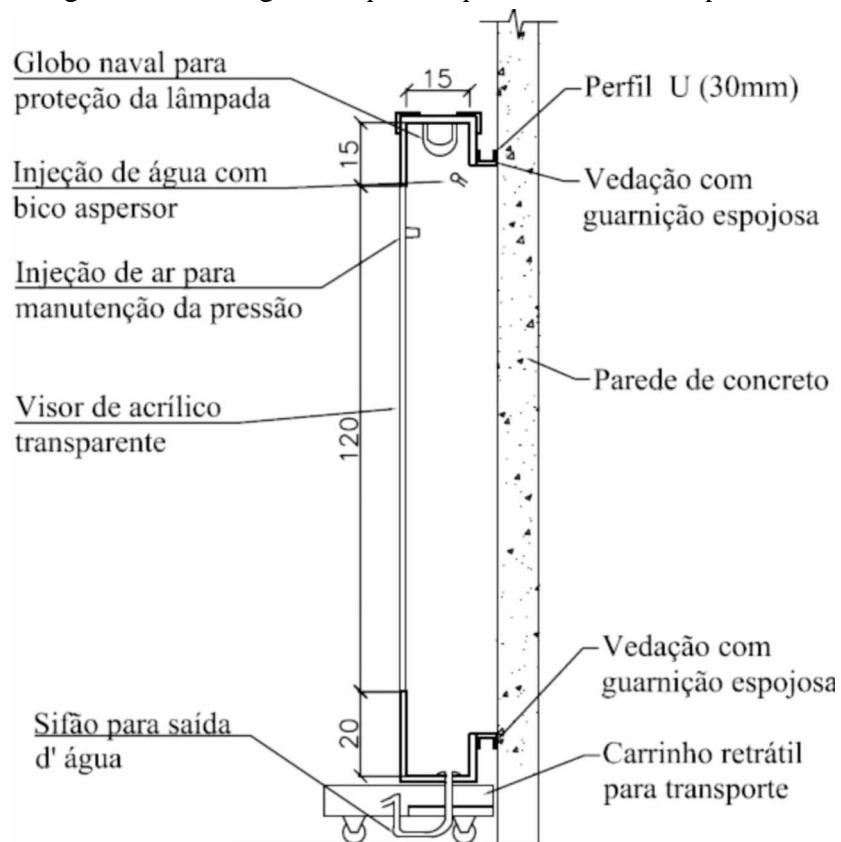


Fonte: Autor

A câmara foi fixada à parede fazendo-se uso de parafusos do tipo *parabolts* e as suas áreas de contato foram vedadas por meio de guarnição esponjosa, conforme mostrado no detalhe da Figura 28, vedada por silicone ou similar, quando necessário devido à irregularidade da superfície.

Logo em seguida foi aplicado a vazão de água especificada ligada à rede pública de fornecimento de água e a pressão por meio de compressor de ar ligado a válvulas de controle de pressão imediatamente antes da conexão da câmara.

Figura 28 – Montagem do aparelho para ensaio de estanqueidade



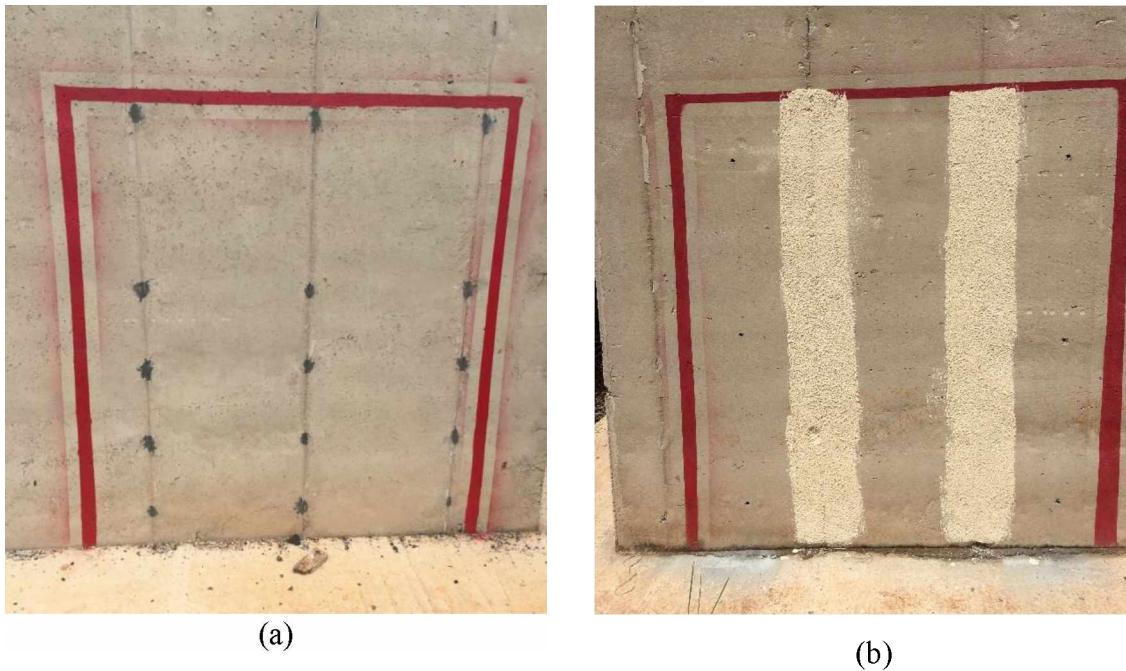
Fonte: adaptado do Anexo C da ABNT NBR 15575-4:2013

A área do ensaio foi delimitada com tinta e continha a região de concreto e os furos das chapas de travamento transversal. Os furos, em cada um dos protótipos, foram devidamente vedados. Foi utilizado três tipos de vedação: com resina epóxi; argamassa cimentícia – estucamento e com argamassa cimentícia e textura como mostra a Figura 29 (a); para evitar

todo tipo de interferência no ensaio como por exemplo, a criação de um caminho preferencial de infiltração da água.

As paredes de concreto executadas no local eram estucadas com argamassa cimentícia e após as 72 horas indicadas pelo fabricante para cura, aplicava-se massa de textura em camada única para regularização da superfície e minimização de imperfeições. A fim de repetir este procedimento, assim como buscando-se situações extremas de teste, foram ensaiadas paredes com estuques de resina epóxi, com e sem a textura de acabamento como também paredes com estuques de argamassa cimentícia (AC I), com e sem textura de acabamento (Figura 29 (a) e (b)).

Figura 29 – Área de ensaio com estuque (a) e com estuque e textura (b).



Fonte: Autor

A duração do ensaio foi de 7h, e foram registrados para cada ensaio: o tempo de aparecimento da primeira mancha de umidade na face interna, oposta à incidência da água e pressão; porcentagem da área da mancha de umidade ao final do ensaio em relação à área total da face interna. Segundo a ABNT NBR 15575-4:2013, para ser considerado aceito o

desempenho do SVVE o somatório das áreas das manchas de umidade para pavimentos terreos não pode exceder 10% da área total de aplicação ensaiada.

### 5.5.5 Ensaio de absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade fornece informações sobre a estrutura porosa do concreto que representam as reais condições. Assim, o conjunto de poros, conectividade, dimensões, etc. estarão representadas. Desta forma, torna-se possível comparar concretos, concluindo sobre uma característica que tem relação com a durabilidade.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado em um recipiente aberto e o nível de água foi assegurado manualmente.

Os procedimentos seguidos segundo a ABNT NBR 9779:2012 foram: determinação da massa do corpo de prova ao ar e secá-lo em estufa à temperatura de  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  até a constância de massa. Após resfriado à temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  sua massa foi determinada novamente.

Os corpos de prova foram posicionados sobre pequenos suportes que garantiram a molhagem do fundo do mesmo. Em seguida, o recipiente foi preenchido com água de modo que o nível de água permanecesse constante a  $5 \pm 1$  mm acima da sua face inferior, evitando a molhagem de outras áreas, como mostra a Figura 30.

Figura 30 – Ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: Autor

As massas dos corpos de prova foram aferidas com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h de ensaio com a superfície seca com pano úmido. Após cada leitura, os corpos de prova voltaram imediatamente para seus respectivos recipientes. Após a última leitura, os corpos de prova foram encaminhados para ensaio de absorção de água por imersão e fervura.

### 5.5.6 Ensaio de absorção de água por imersão

A preparação do ensaio de absorção de água por imersão é a mesma do ensaio de absorção de água por capilaridade, ou seja, os corpos de prova foram secos até a estabilidade de massa. Por isso, foram usados os mesmos corpos de prova do ensaio do item anterior.

A metodologia de ensaio segue as recomendações da norma ABNT NBR 9778:1987 que recomenda que os corpos de prova sejam previamente saturados em água à temperatura ambiente e em seguida serem colocados em um recipiente em que a água possa atingir sua temperatura de ebulação e assim continuar por 5 h. Para realização deste ensaio foi utilizada a autoclave do Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia Civil, que possui a capacidade de carga para receber todos os corpos de prova envolvidos neste ensaio.

Após o término do tempo de fervura deixou-se o conjunto resfriar por no mínimo 14 h, para em seguida realizar a pesagem em balança hidrostática e em balança comum com a superfície seca. Com estes resultados é possível calcular o índice de vazios total da amostra segundo a Equação 20 e a absorção porcentual total, segundo a Equação 21.

$$IV (\%) = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (20)$$

$$A (\%) = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (21)$$

Onde  $M_{sat}$  é a massa do corpo de prova saturado,  $M_s$  é sua massa seca à estabilidade de massa e  $M_i$  é a massa do corpo de prova saturado, imerso em água.

# CAPÍTULO 6

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Estado Fresco

Os ensaios do concreto no estado fresco foram os ensaios de recebimento e verificação das condições de concretagem. Os ensaios de abatimento do tronco de cone foram realizados somente antes da inserção do aditivo incorporador de ar e se encontram relacionados na Tabela 9, dentro da faixa especificada de  $(200\pm30)$ mm. O resultado exemplificado da Figura 31 mostra o aspecto do material no estado fresco, com abatimento de 20 cm.

Tabela 9 – Abatimento de tronco de cone para concreto sem aditivo

Concreto	Abatimento (mm)
<b>Protótipo 1 – Concreto referência</b>	185
<b>Protótipo 2 – Posterior C-0,5%</b>	200
<b>Protótipo 3 – Posterior C-1,0%</b>	200

Fonte: Autor

Figura 31 – Abatimento de tronco de cone



Fonte: Autor

O teor de ar segundo as porcentagens de aditivos e suas respectivas massas específicas se encontram na Tabela 10, que mostra a média dos valores de duas determinações no estado fresco. A Tabela 10 ainda mostra a diminuição da massa específica com o aumento do teor de ar e o aumento já esperado do teor de ar segundo o aumento do teor de aditivo.

Tabela 10 – Dados do concreto no estado fresco com aditivo

Tipo de concreto	Teor de ar (%)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
<b>C – 0,0%</b>	1,29%	2308,8
<b>C – 0,5%</b>	9,50%	2145,3
<b>C – 1,0%</b>	14,50%	2044,0

Fonte: Autor

Em seguida procedeu-se à moldagem dos corpos de prova (Figura 32), realizada segundo a ABNT NBR 5738:2015, que especifica 12 golpes superficiais para corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro para resultados de abatimentos acima de 160 mm, identificados e colocados em câmara úmida.

Figura 32 – Moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autor

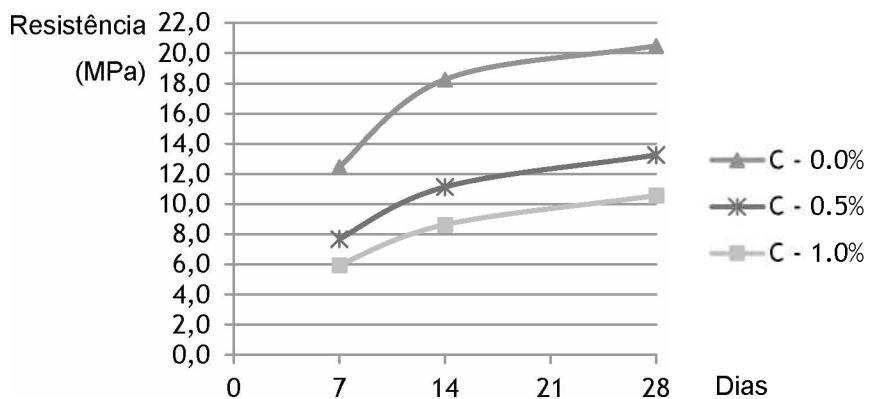
Os corpos de prova foram desmoldados com 24 h e submersos em água ou deixados ao ar em ambiente protegido para assim ficarem por 28 dias.

## 6.2 Resistência à compressão

O ensaio para determinação da resistência à compressão foi realizado aos 7, 14 e 28 dias para controle da influência do teor de aditivo no ganho de resistência. Os resultados encontram-se na Figura 33 onde é possível notar a queda da resistência com o aumento do teor de aditivo para todas as idades.

Obteve-se uma diminuição média de 37,5% dos valores da resistência do concreto referência para o concreto com 0,5% de aditivo e queda média de 44,7% para 1,0% de aditivo.

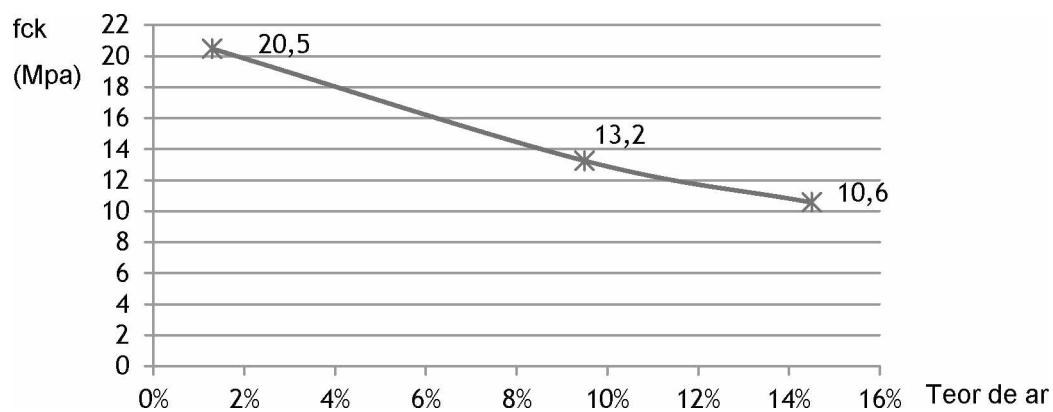
Figura 33 – Resistência à compressão (MPa) por idade em dias.



Fonte: Autor

A análise da resistência à compressão em função do teor de ar também é possível de ser realizada conforme a Figura 34, que mostra a variação da resistência em MPa aos 28 dias por teor de ar indicados na Tabela 10.

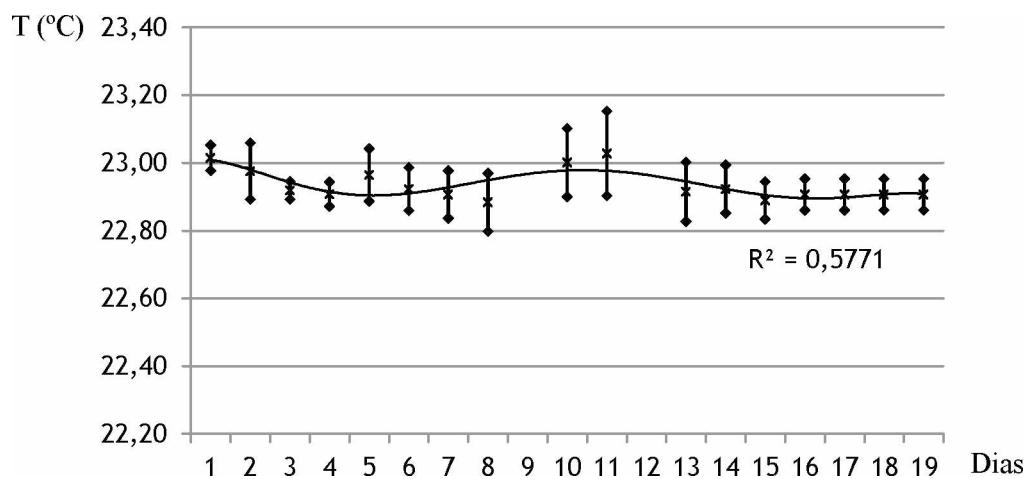
Figura 34 – Variação da resistência aos 28 dias (MPa) com os teores de ar



Fonte: Autor

### 6.3 Carbonatação Acelerada

O ensaio de carbonatação começou quando os corpos de prova já estavam com 110 dias de idade ou seja, com alto grau de hidratação e durou 95 dias. Com a câmara em local climatizado, a temperatura se mostrou dentro da faixa de valores normalizada para os ensaios de cimento de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ , como é representada a amostra de 19 dias de ensaio na Figura 35. O valor máximo encontrado para esta variável, durante todo o tempo de ensaio foi de  $23,35^\circ\text{C}$ .

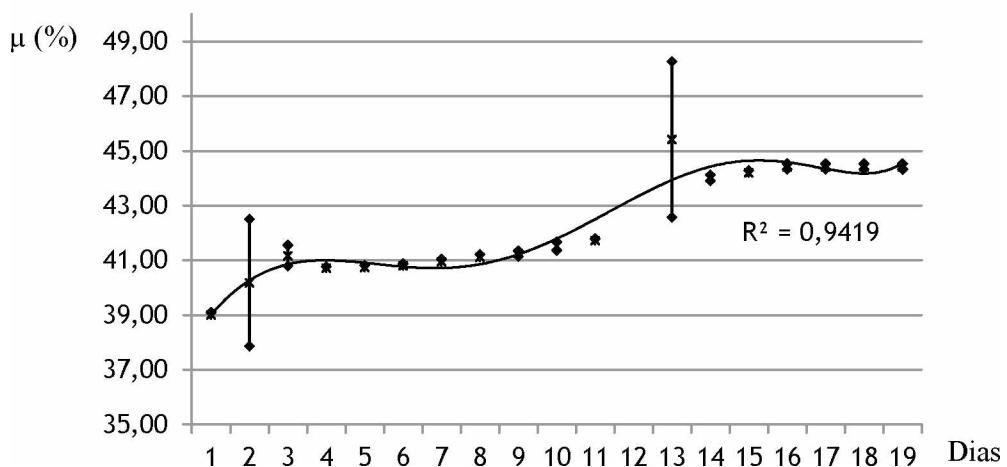
Figura 35 – Variação diária de temperatura ( $^\circ\text{C}$ ) para 19 dias de ensaio

Fonte: Autor

O controle da umidade, apesar de complexo, mostrou comportamento de aumento constante de 1,5% em média para cada 20 dias, porém abaixo da faixa de valores desejada. Com o controle da temperatura, a variação da umidade foi muito pequena, mesmo que, ao longo do ensaio tenha sido injetado vapor com o auxílio de um nebulizador instalado no interior da mesma, a fim de aumentar seu valor porcentual.

Os picos que se observa na Figura 36 são das tentativas de aumento da umidade total da câmara, por meio de injeção de vapor uma vez que os corpos de prova foram secos em estufa. Tomou-se o cuidado para não saturar a câmara, pois uma vez com a umidade muito alta seria trabalhoso diminui-la. O máximo valor para a umidade foi de 66,5%.

Figura 36 – Variação diária da umidade (%) para 19 dias de ensaio



Fonte: Autor

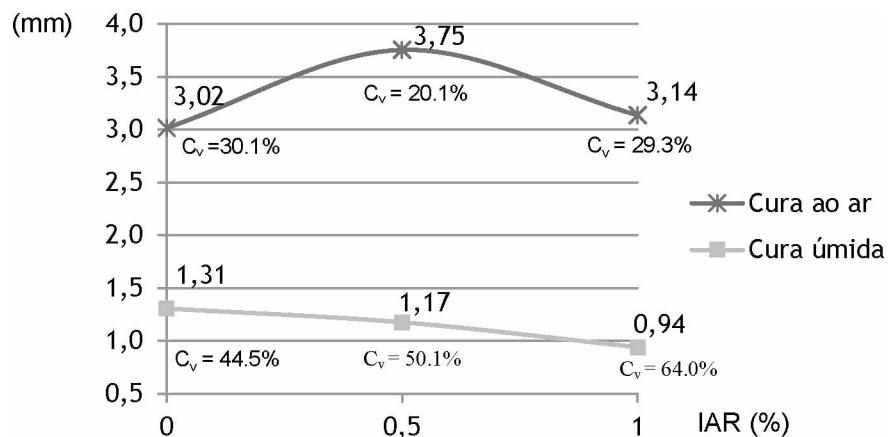
Não foi possível a determinação da concentração precisa de gás carbônico no interior do aparato. No entanto, foi feito vácuo para posterior saturação de CO<sub>2</sub> no seu interior, considerando-se para fins deste experimento, concentração próxima de 100%.

Ao final do ensaio, após a ruptura e aspersão com fenolftaleína, os resultados foram validados estatisticamente pelo critério de Chauvenet aplicado para cada corpo de prova. Esse critério especifica que, para uma amostra com distribuição normal, um valor medido

pode ser rejeitado se a probabilidade de se obter o desvio deste em relação à média é menor que  $1/2n$ , sendo  $n$  o número de valores (VUOLO, 1996).

Devido ao posicionamento dos corpos de prova com pouca circulação de ar abaixo dos mesmos, os resultados obtidos para o fundo dos corpos de prova foram 60% menores ou na maioria dos corpos de prova, inexistentes. Logo, os valores médios finais da espessura da frente carbonatada foram calculados somente com os dados provenientes das paredes dos corpos de prova. A média foi obtida pela medição em cerca de 200 posições para corpos de prova de cada teor de aditivo com cura ao ar e cerca de 40 posições para corpos de prova curados de forma submersa pois de acordo com Rilem (1988) medidas menores que 0,5 mm devem ser desprezadas. A variação da quantidade de resultados se dá pela diferenciação nítida ou não da frente carbonatada e assim pela possibilidade de ser ter uma leitura nítida com o paquímetro. Esses resultados se encontram na Figura 37, assim como os valores do coeficiente de variação dos resultados.

Figura 37 – Espessura média da frente de carbonatação (mm)

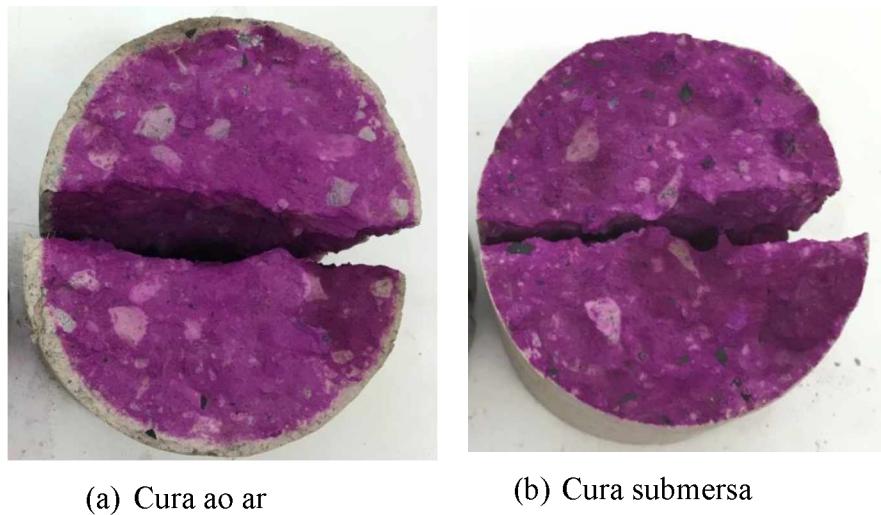


Fonte: Autor

Os resultados dos coeficientes de variação foram maiores para os valores de carbonatação obtidos com cura submersa. Helene (1997) adota um coeficiente de variação de 25% em seu modelo de vida útil de estrutura, Vuolo (1996) caracteriza uma distribuição de dados como heterogênea quando os coeficientes de variação se encontram acima de 30%. Assim, os resultados mostrados na Figura 37 para a cura submersa são considerados dispersos.

Ademais, o valor médio de profundidade de carbonatação de 3,18 mm para amostras curadas ao ar com 1,0% de aditivo mostrado na Figura 38 (a) não representa o modo como o fenômeno também se mostrou de forma difusa em zonas de transição no interior dos corpos de prova devido ao fato de conter somente leituras realizadas nas paredes do mesmo. O fenômeno ocorreu no interior do material devido ao alto teor de ar evidenciando a interconexão dos vazios presentes na pasta devido ao seu processo de cura.

Figura 38 – Carbonatação em concretos com 1,0% de aditivo



Fonte: Autor

Fica claro também a influência do processo de cura na durabilidade do material pois a cura ao ar representou um aumento de 218,8% na profundidade de carbonatação para o concreto referência, de 322,4% para 0,5% de aditivo e 281,4% para 1,0% de aditivo. A tendência de diminuição da profundidade de carbonatação aumentando-se o teor de aditivo prova que a incorporação de ar, para corpos de prova curados via úmida por 28 dias, gera vazios não conectados e por isso não prejudica a durabilidade deste material.

#### 6.4 Ataque ácido

O ensaio de ataque ácido foi iniciado nos corpos de prova com a idade de 36 dias e continuou por 60 dias. O nível da solução ácida foi constantemente verificado a fim de que o corpo de prova, já dividido pela metade, permanecesse sempre submerso. Notou-se a

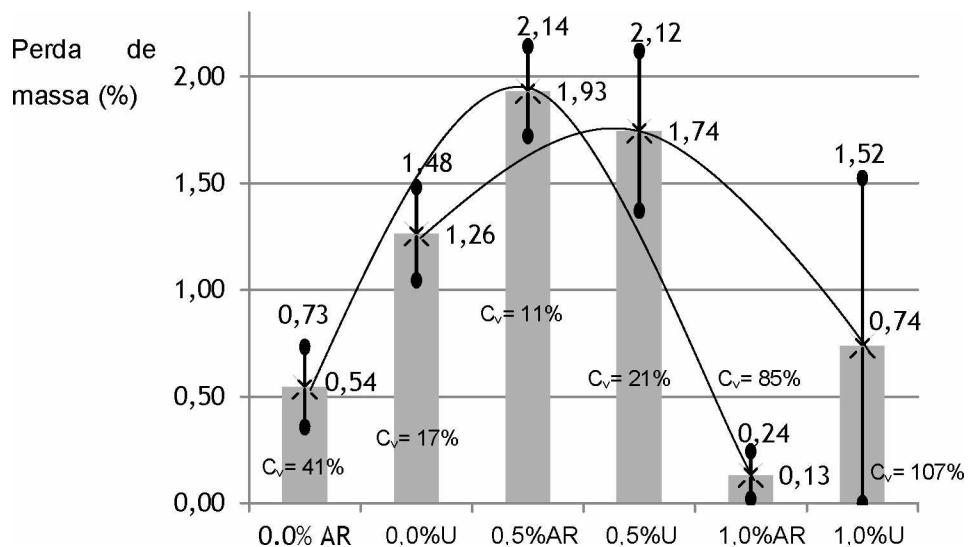
mudança da cor da solução ácida ao longo do ensaio para tons de marrom avermelhado e em alguns recipientes, a formação de sólidos em suspensão como a mostrada na Figura 39 que possuíam cores que variavam do marrom para o cinza. Os resultados de perda de massa foram obtidos e validados pelo critério de Chauvenet, e se encontram na Figura 40 onde é possível visualizar a variabilidade dos dados, representada pelas barras de erro e os seus coeficientes de variação.

Figura 39 – Suspensão sólida em solução ácida



Fonte: Autor

Figura 40 – Perda de massa (%) por tipo de concreto e tipo de cura



Fonte: Autor

Segundo Beddoe (2016), a taxa de degradação causada pela solução ácida é primeiramente controlada pela difusão do ácido através das camadas mais superficiais aumentando sua porosidade e caso as camadas mais internas estejam ainda estáveis, podem agir como protetoras para que desestabilização da pasta diminua. Ademais, a porosidade da camada degradada pode ser reduzida pela precipitação do sal de acetato de cálcio, uma vez que os

ensaios foram feitos de modo estático, sem agitação da solução, e portanto sem fluxo abrasivo que contribuiria para o aumento da perda de massa. Outros fatores que influenciam o transporte da solução são o efeito de parede e a disposição dos agregados que possuem maior permeabilidade nas zonas de transição.

Os coeficientes de variação para o concreto com 0,5% de aditivo mostraram uma distribuição de dados homogêneos para a cura ao ar, e dados medianamente dispersos para a cura submersa. Para o concreto referência, sem aditivo IAR, os dados se mostram confiáveis para a cura submersa e já para a cura ao ar os resultados estão mais heterogêneos.

Os resultados para o concreto com teor de 1,0% de aditivo geraram coeficientes de variação muito altos, impossibilitando uma análise confiável do comportamento. Uma possível explicação seria devido ao alto teor de ar (14,5%) e a possível desconexão dos poros, causada pela presença do aditivo e diminuição da reação devido à precipitação do produto da reação.

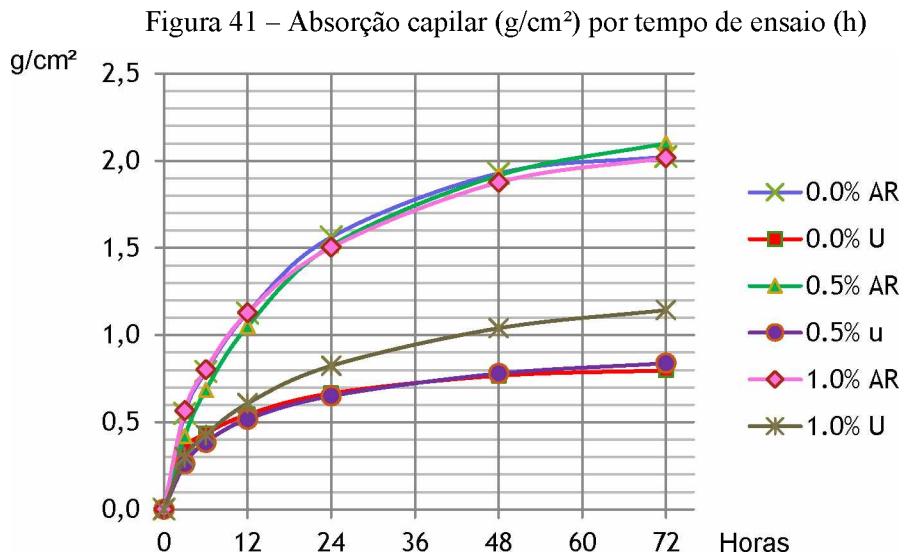
Ainda assim, o concreto que mais apresentou perda porcentual de massa foi com 0,5% de aditivo, para os dois tipos de cura. O comportamento do gráfico foi semelhante à uma parábola negativa que possui valor mais baixo para o teor mais alto de aditivo.

Apesar de possuir dados muito heterogêneos, esse resultado se mostra condizente com o resultado obtido para o ensaio de carbonatação em que o concreto C-1,0% é o mais resistente, dentre os do mesmo tipo de cura, à penetração de agentes agressivos devido à desconexão dos poros e consequente aumento da dificuldade de transporte de massa no seu interior.

## **6.5 Absorção por capilaridade**

Foram aferidas as massas dos corpos de prova com superfície seca para 3 h, 6 h, 12 h, 24 h, 48 h, e 72 horas. A absorção de água foi expressa em termos de quantidade de água

absorvida por área da seção transversal, sendo sua unidade  $\text{g}/\text{cm}^2$  (ABNT NBR 9779:2012), e os resultados se encontram na Figura 41.



Fonte: Autor

A quantidade de água absorvida pelos corpos de prova curados ao ar foi muito próxima, demonstrando independência do teor de ar para esse tipo de cura e a tendência de todas as três curvas convergirem para uma só. A Tabela 11 resume a quantidade de água absorvida ao final do ensaio, ou seja, com 72h e seus respectivos coeficientes de variação.

Tabela 11 – Resultados ao final do ensaio (72h) e seus coeficientes de variação

% IAR	$\text{g}/\text{cm}^2$	CV
<b>0,0% AR</b>	2,023	8,64%
<b>0,0% U</b>	0,797	24,68%
<b>0,5% AR</b>	2,099	9,36%
<b>0,5% U</b>	0,838	22,31%
<b>1,0% AR</b>	2,016	8,37%
<b>1,0% U</b>	1,143	4,16%

Fonte: Autor

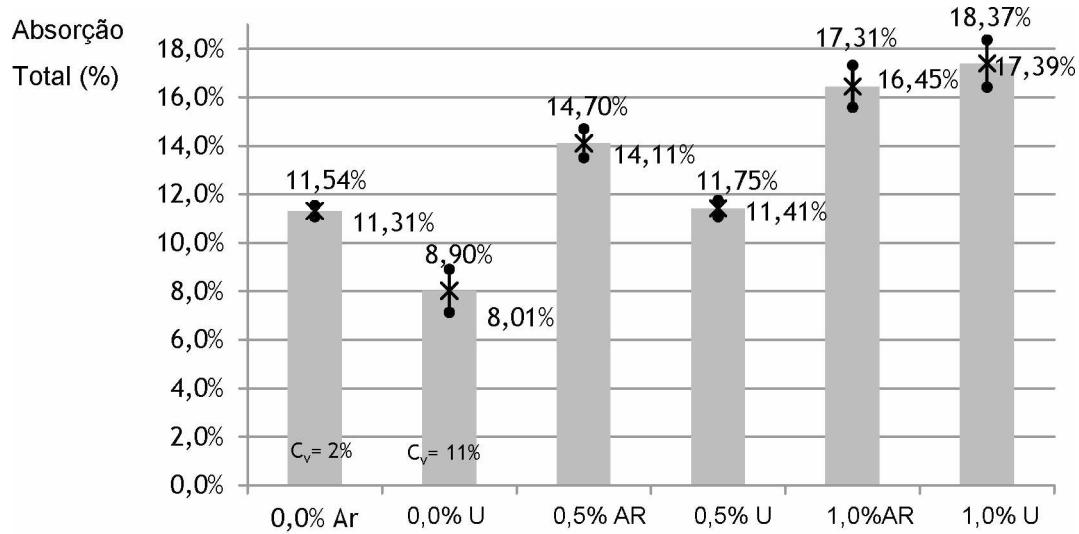
Os coeficientes de variação para o teor de aditivo de 0,0% AR foram menores que 15%, provando a homogeneidade dos resultados, e para 0,0% U o maior coeficiente de variação encontrado foi de 25%, classificando-os como medianamente homogêneos.

O comportamento semelhante dos resultados para a cura submersa ocorreu para os teores de 0,0% e 0,5% que obtiveram diferenças ínfimas de valores e o teor de 1,0% de aditivo teve um comportamento de absorção maior que os anteriores. Apesar de ser o bloco amostral que demonstrou menor profundidade de carbonatação e menor perda de massa que o grupo de 0,5% de aditivo, para esta propriedade obteve um comportamento contrário.

## 6.6 Absorção por Imersão

O ensaio de absorção por imersão foi realizado em seguida aos ensaios de absorção por capilaridade e seus resultados encontram-se na Figura 42 onde torna evidente a tendência geral de aumento da absorção total seguindo o aumento do teor de aditivo. A Figura 42 também indica a variabilidade dos resultados para o mesmo grupo amostral, em termos porcentuais. Todos os resultados obtiveram um coeficiente de variação menor que 15% mostrando-se uma distribuição de dados bastante homogênea e representativa do comportamento global do material.

Figura 42 – Absorção total por imersão e fervura por teor de aditivo e cura



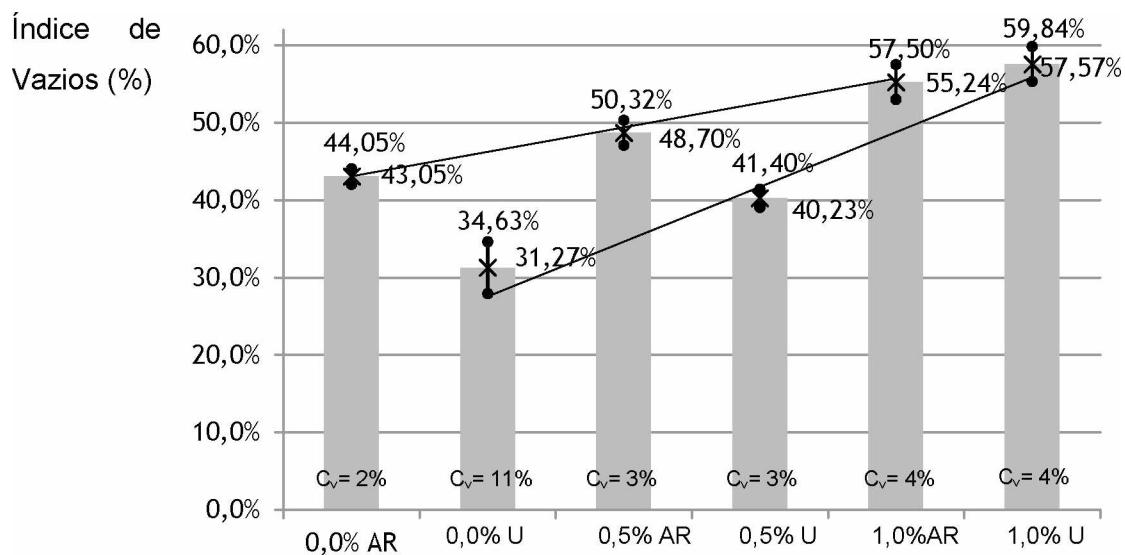
Fonte: Autor

Para os teores de 0,0% e 0,5% de aditivo, os grupos curados ao ar obtiveram uma porcentagem maior de absorção de água devido à sua estrutura mais porosa inerente ao processo de cura. Para o teor de 1,0% de aditivo, os grupos de diferentes curas se

comportaram diferentemente dos anteriores, sendo que a cura submersa obteve um valor médio maior em 5,7% que o grupo de mesmo teor de aditivo com cura ao ar. Uma possível explicação pode ser devido às tensões resultantes do processo de secagem em estufa, onde a alta temperatura gera microfissuras para saída do vapor de água. Assim, supõe-se que esse bloco amostral possui microfissuras que, quando submetidas à pressão da autoclave com a água a temperaturas mais altas e portanto com menor viscosidade, revelou maior absorção.

Do mesmo ensaio obteve-se o resultado de índice de vazios e seu comportamento, mostrado na Figura 43, assemelha-se ao comportamento da absorção representado na Figura 42, podendo ter análise análoga. Da mesma forma que a absorção por imersão, o índice de vazios mostrou uma distribuição de dados homogênea com coeficientes de variação abaixo de 15%.

Figura 43 – Índice de vazios por teor de aditivo e tipo de cura



Fonte: Autor

A utilização de cura submersa para os teores de ar incorporado de 0,0% e 0,5% revela queda de 27,4% e 17,4% respectivamente, do valor do índice de vazios comparativamente aos seus valores com cura ao ar.

## 6.7 Estanqueidade

O ensaio de estanqueidade foi feito nos 3 protótipos. No protótipo C-1,0%, a vedação dos furos foi com resina epóxi, no protótipo C-0,5% foi feito duas paredes com epóxi e textura acrílica e as duas outras paredes somente com estuque de argamassa AC I. No protótipo C-0,0% foi feito estuque argamassado e textura acrílica, assemelhando-se à obra do residencial.

A câmara de ensaio foi acoplada às paredes com parafusos do tipo parabolts, a vazão de trabalho foi de 5 dm<sup>3</sup>/min a 7 dm<sup>3</sup>/min, um pouco acima da especificada pela norma para que se conseguisse a lâmina contínua de água necessária para realização do ensaio. A área útil de ensaio foi de 15525 cm<sup>2</sup>, ficando toda ela exposta à lâmina de água e à pressão de serviço. O aparato acoplado à parede está exemplificado na Figura 44, onde mostra também uma lona que foi colocada para proteção da área ensaiada contra as chuvas.

Figura 44 – Aparato acoplado à parede

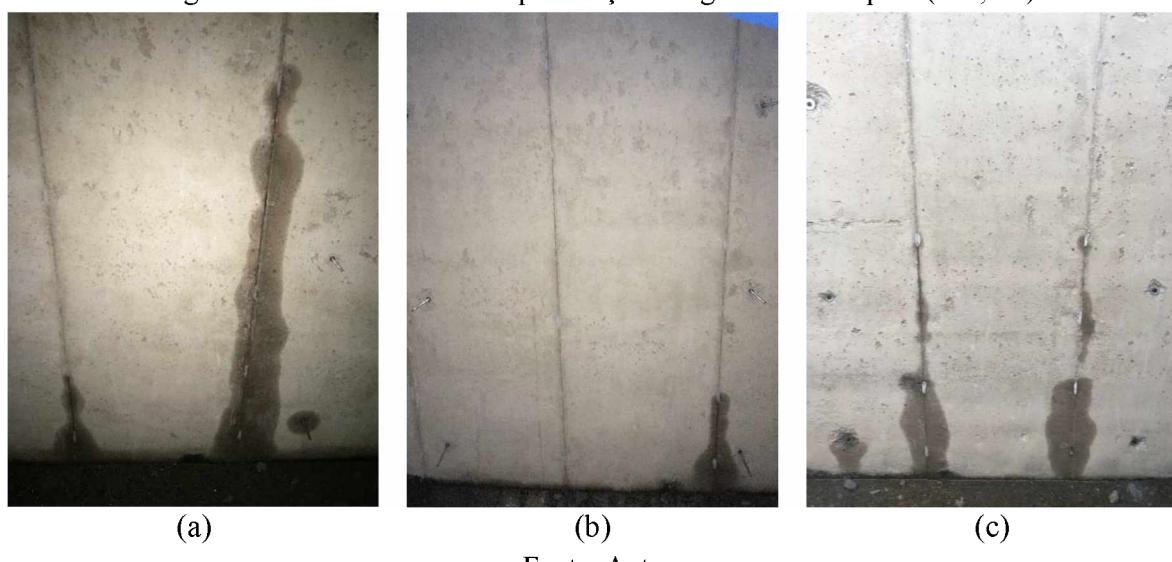


Fonte: Autor

No caso do protótipo estucado com resina epóxi, antes dos primeiros 30 minutos de ensaio foi possível visualizar vazamentos nos furos devido à infiltração de água nas interfaces entre a resina epóxi e os furos. A superfície de ligação entre o estuque feito com resina epóxi e o concreto se mostrou um caminho preferencial para entrada e percolação de água, apresentando assim, um possível ponto de fragilidade desta parede. Em alguns casos era possível observar a formação de um “fio d’água”, o que mostrou a ineficiência deste tipo de estuque, conforme a forma que foi aplicado.

Não houveram manchas de umidade na região do concreto em si, somente nos pontos das faquetas. A Figura 45 representa o ocorrido para o protótipo 3 que possui IAR 1,0%, mostrando também que a vedação executada neste protótipo em resina epóxi não apresenta a garantia de estanqueidade.

Figura 45 - Manchas devido à percolação de água no Protótipo 3 (C-1,0%)

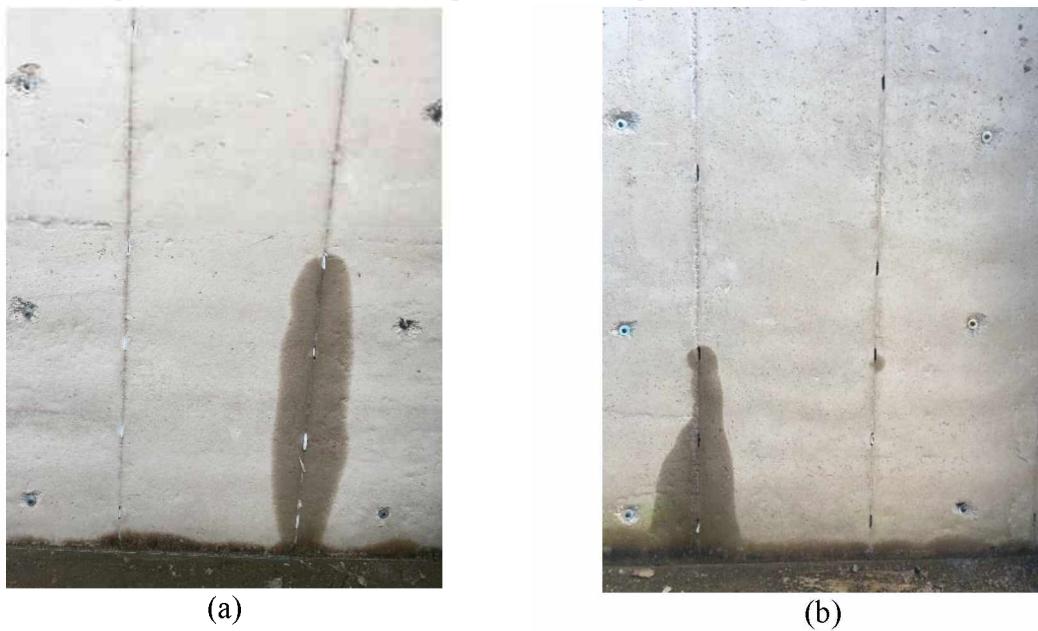


Fonte: Autor

A duração de cada ensaio foi de 7 h e o resultado é expresso em termos de área porcentual da mancha de umidade em relação à área útil exposta à simulação de chuva, presente na face oposta à aplicação da vazão. Uma vez que as manchas resultantes na face oposta à do ensaio foram infiltrações nos estuques das faquetas, estas áreas não foram contabilizadas como “manchas de umidade” para este ensaio de estanqueidade uma vez que o material se mostrou estanque.

No protótipo C-0,5% em que foi colocado estuque epóxi com aplicação de textura acrílica ocorreu o mesmo problema que no protótipo anterior, como pode ser observado na Figura 46. Assim sendo, o estuque epóxi mostrou a sua ineficácia mesmo com a aplicação da textura acrílica. Novamente as áreas não foram contabilizadas pois o material se mostrou estanque.

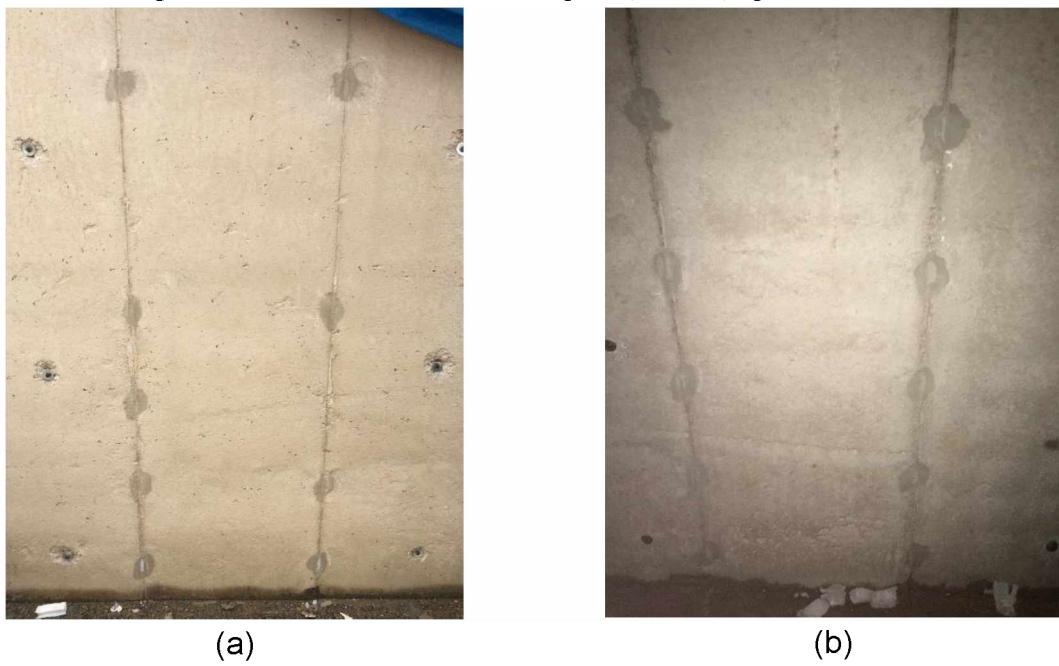
Figura 46 – Manchas devido à percolação de água no Protótipo 2 (C-0,5%)



Fonte: Autor

Os ensaios feitos no protótipo C-0,5% com estuques argamassados se mostraram completamente estanques, sem nenhuma mancha de umidade nas paredes opostas à aplicação da vazão de água conforme mostra a Figura 47.

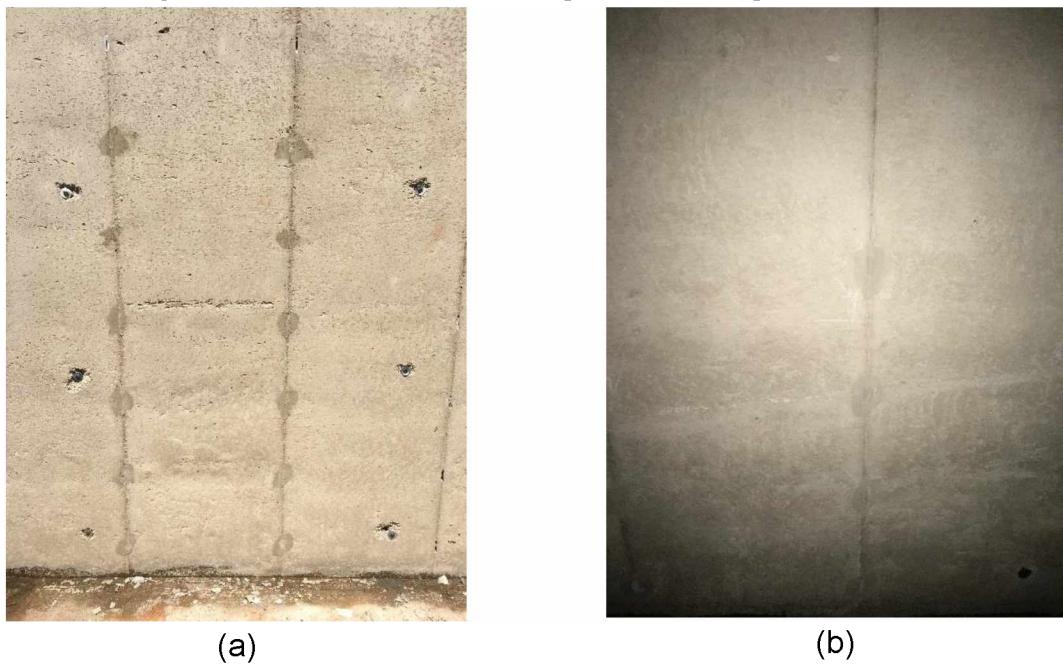
Figura 47 – Parede interna do Protótipo 2 (C-0,5%) após 7h de ensaio



Fonte: Autor

Por sua vez, no protótipo C-0,0%, cuja aplicação foi de estuques argamassados e textura acrílica, se mostraram também completamente estanques, sem nenhuma mancha de umidade nas paredes opostas à aplicação da vazão de água conforme mostra a Figura 48.

Figura 48 - Parede interna do Protótipo 1 (C-0,0%) após 7h de ensaio



Fonte: Autor

Assim sendo, nos protótipos C – 0,5% e C-0,0% com estuque argamassado e estuque argamassado com textura, respectivamente, não foi possível identificar manchas de umidade nas paredes internas ao longo do ensaio que teve duração de 7 horas, o que mostra que as paredes eram completamente estanques. As juntas das formas metálicas, por onde passavam faquetas que eram usadas para travamento das formas durante a concretagem foram tratadas com estuque e textura acrílica, o que se mostrou suficiente para garantir a estanqueidade total das paredes e comprovar o desempenho do sistema de vedação vertical em paredes de concreto com aditivo incorporador de ar, segundo a ABNT NBR 15575-4:2013.

# CAPÍTULO 7

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todo o trabalho desenvolvido foi experimental e os resultados devem representar o mais próximo possível as características analisadas. Tratando-se de critérios estatísticos para tratamento de resultados, o Critério de Chauvenet mostrou-se eficaz em relação à eliminação de alguns pontos discrepantes melhorando o comportamento estatístico sem perda significativa do número de dados. Ainda assim, obteve-se alguns resultados com altos coeficientes de variação devido à variação experimental e à heterogeneidade intrínseca da pasta.

O comportamento do concreto no ensaio de carbonatação comprovou a importância da cura para formação de compostos resistentes de baixa permeabilidade pois as maiores profundidades de carbonatação foram encontradas para os concretos curados ao ar. A tendência de diminuição da profundidade de carbonatação com o aumento do teor de aditivo mostra que a incorporação de ar, para corpos de prova curados via úmida, gera vazios não conectados e não prejudica a durabilidade deste material, mesmo que os resultados tenham sido considerados heterogêneos.

No entanto, vale ressaltar que a realização dos ensaios em corpos de prova curados ao ar foi para simular as condições em obra. Sendo assim, ainda que os resultados de carbonatação para o concreto curado ao ar fossem de baixa variabilidade, o comportamento do concreto com 1,0% de aditivo evidencia um limite do resultado experimental, uma vez que não representa todo o processo de carbonatação ocorrido e sim somente a frente carbonatada.

Os resultados de perda de massa ao ataque ácido foram condizentes com os resultados de carbonatação para o concreto curado ao ar, uma vez que o teor de 0,5% foi o que

apresentou maior profundidade de carbonatação foi também o que mais apresentou perda porcentual de massa ao ataque ácido. Este ensaio também teve seus resultados com altos coeficientes de variação para o teor de 1,0% de aditivo, para ambos os tipos de cura devido à sua alta variabilidade de perda de massa que pode ser explicada não somente devido ao crescimento da quantidade de poros, mas também pela precipitação do acetato de cálcio que retardou a reação estática.

Para o concreto 0,0%AR sua perda de massa foi 2,33 vezes maior que o do mesmo teor de aditivo com cura submersa. Resultado este que pode ser explicado devido às pressões internas resultantes do processo de secagem em estufa e consequente microfissuração da pasta. Já para o teor de 0,5% de aditivo o comportamento das amostras se mostra o oposto quando o bloco amostral curado ao ar apresenta 10% mais perda de massa que o seu similar curado via úmida. Isso serve de constatação de que, com este teor de aditivo, a porosidade devido ao processo de cura influenciou mais na penetração do ácido no corpo de prova e sua consequente instabilidade da pasta do que as amostras curadas por via úmida tiveram de dificuldade para eliminar o vapor interno de água dos seus poros. Assim, pôde-se perceber que o concreto com 1,0% de aditivo possui a maior durabilidade, uma vez que possui a menor perda de massa devido ao ataque ácido e a menor profundidade carbonatada.

O ensaio de absorção por capilaridade mostrou o comportamento similar dos blocos amostrais curados ao ar, não importando o teor de aditivo. Sabe-se que a propriedade de capilaridade é tanto maior quanto menor forem os poros presentes na estrutura, e portanto pode-se concluir que a rede de poros criada foi muito semelhante entre eles por ser uma característica intrínseca do tipo de cura. Como o aditivo incorporador de ar cria bolhas consideradas estáveis e por isso mesmo podem ser isoladas, para este tipo de cura não observou a influência delas devido ao aumento do teor de ar.

Já para as amostras curadas via úmida, os teores de 0,0% e 0,5% mostraram comportamentos similares de absorção capilar e o teor de 1,0% mostrou absorção maior que os outros dois teores de aditivo. Com esse teor, as amostras continham cerca de 14,5%

de ar incorporado o que pode revelar uma certa interconexão dos poros e por isso mesmo uma maior absorção capilar.

Para os ensaios de estanqueidade, nas aberturas deixadas pelas faquetas, o método de aplicação de estuque e textura é suficiente para resistir à chuvas com as pressões de vento sem apresentação de manchas de umidade nas faces interiores, sendo portanto o sistema completamente estanque. O estuque realizado com resina epóxi não se mostrou eficiente deixando percolar água na face oposta da parede, ao passo que o estuque feito com a argamassa AC I foi eficaz para garantir a estanqueidade do conjunto com a presença ou ausência da textura acrílica.

Pode-se concluir que o sistema construtivo de paredes de concreto possui paredes estanques tal qual executado em obra, e portanto, pode-se garantir o desempenho mínimo desta estrutura segundo este quesito, de acordo com a ABNT NBR 15575:2013 uma vez que a referida norma traz como critério mínimo de desempenho manchas que totalizem até 10% da área ensaiada e os protótipos estucados com argamassa ACI não apresentaram nenhuma mancha. Também possui porcentagens de mesma ordem de grandeza de absorção de água por capilaridade, não importando o teor de aditivo incorporador de ar, elevada durabilidade representados por baixos porcentuais de perda de massa devido ao ataque ácido e baixas profundidades de carbonatação relativo ao ensaio acelerado de 95 dias a 100% de CO<sub>2</sub>.

Para estudos futuros, recomenda-se ensaios com controle de concentração de CO<sub>2</sub> ou com possibilidade de variação dessa concentração para fins de estimativa de vida útil. A análise de outras variáveis como a agressividade de outros ácidos ou simplesmente a investigação da perda de massa por meio de ataque ácido com agitação da mistura, e não somente por meio estático também pode ser indicado para estudos posteriores. Não obstante, o mesmo estudo pode ser repetido com outras concentrações do aditivo incorporador de ar, ou até o seu limite indicado pelo fabricante de 1,5%, para verificação do comportamento ou a tendência deste material diante de mais diagnósticos.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial.** Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738 - Concreto** - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015

\_\_\_\_\_. **NBR 5739 – Concreto** – Ensaios de compressão-de-corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto** – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211 – Agregado para o concreto** – Procedimentos. 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 9778 – Argamassa e concreto endurecidos** – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779 - Argamassa e concreto endurecidos** – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 9062 – Projeto e execução de estruturas de Concreto Pré-Moldado.** Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 10787 – Concreto endurecido-** Determinação da penetração de água sob pressão. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575 – Edificações Habitacionais: Desempenho.** Partes 1 a 6. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 16055 – Paredes de concreto moldada no local para construção de edificações** – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 47 – Concreto** – Determinação de teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67 - Concreto** – Determinação da consistência pelo abatimento de

tronco de cone. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Paredes de concreto em Uberlândia.** 2014. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/paredes-de-concreto-em-uberlandia>>. Acesso em: 01 out. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. Curso básico de alvenaria estrutural, São Paulo, 2010.

ALVES, N.J.D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento.** 175p. Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília. Brasília, 2002.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: Gen Ltc, 2000. 2 v. Reimpressão de 2013.

BEDDOE, R. E. **Modelling acid attack on concrete: Part II, a computer model.** Cement and Concrete Research 88 (2016) 20-35. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.10.012>

CASSAL, S.B. **A influência da Adição de Cinza de Casca de arroz na resistência de concretos e ácido.** 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) UFRGS . Porto Alegre 2000.

CHATVEERA, B; LERTWATTANARUK, P. **Evaluation of nitric and acetic acid resistance on cement mortars containing high-volume black rice husk ash.** Journal of Environmental Management 133 (2014) 365-373. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.010>

CINTRA, A. M. **Estudo do desempenho térmico de concretos com ar incorporado.** 2015. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

DA SILVA, T. J. **Mecanismos de Transporte de Massa no Concreto.** Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 Ed. São Paulo: Ibracon, 2011. Capítulo 23. 1968 p.

ECOPORE. **Concreto celular e concreto leve Ecopore.** Disponível em: <<http://www.ecopore.com.br/concreto-celular/>>. Acesso em: 08 out. 2015.

ELGLOBAL. **Elglobal assina contrato para construção de 2469 casas na região oeste de Uberlândia.** 2014. Disponível em: <<http://www.elglobal.com.br/blog/dicaselglobal/elglobal-assina-contrato-para-construo-de-2469-casas-n>>. Acesso em: 15 out. 2015

FALCON P.; ADENOT F.; JACQUINOT J. F.; PETIT J.C.; CABRILLAC M. R. **Long-term behaviour of cement pastes used for nuclear waste disposal: review of physico-chemical mechanisms of water degradation.** Cement Concrete Research 28 (6) (1998) 847-857. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00053-2)

G1 (Uberlândia). **Inscritos no 'Minha Casa, Minha Vida' devem atualizar dados em Uberlândia.** 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/minas-gerais/triangulo-mineiro/noticia/2014/07/inscritos-no-minha-casa-minha-vida-devem-atualizar-dados-em-uberlandia.html>>. Acesso em: 14 out. 2015.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental.** 11 ed. Piracicaba: Livraria Nobel, 1990. 468p.

GORNINSKI, J.P. **Estudo da influência das resinas poliéster isoftálica e ortoftálica e do Teor de Cinza Volante nas propriedades mecânicas e durabilidade do concreto polímero.** 2002. 167 f. Tese Doutorado – UFRGS, Porto Alegre 2002.

HANZIC, L.; ILIC, R. **Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete,** Cement and Concrete Research, v.33, p.1385–1388, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00070-X)

HELENE, P. **Manual de Reparo, Proteção e Reforço de Estruturas de Concreto.** São Paulo: RedReabilitar, 2005.

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> through hydrated cement past. Cement and Concrete Research, v.24, N1 6, p. 1165-1176, 1994.

KULAKOWSKI, M.P.; VIEIRA, F.P.; DAL MOLIN, D.C.C. **Relatório Convênio Camargo Córrea Industrial.** Porto Alegre: Norie/CPGEC/UFRGS, 1997.

LANÇAMENTO. **Prefeitura lança 1440 casas no Faixa II do Minha Casa Minha Vida.** Disponível em : <[http://www.uberlandia.mg.gov.br/2014/noticia/10076/prefeitura\\_lanca\\_1\\_440\\_casas\\_no\\_faixa\\_ii\\_do\\_minha\\_casa\\_minha\\_vida.html](http://www.uberlandia.mg.gov.br/2014/noticia/10076/prefeitura_lanca_1_440_casas_no_faixa_ii_do_minha_casa_minha_vida.html)> Acesso em: 15 out. 2015.

LIGHT STEEL FRAMING. **Casas populares construídas em sistema light steel framing.** 2015. Disponível em <<http://www.diariodoscampos.com.br/imoveis/2012/05/pg-e-primeira-a-usar-lsf-em-casas-populares/984640/>> . Acesso em 10/11/2015

MAGALHÃES, R. M. **Análise de desempenho do sistema estrutural de paredes de concreto com ar incorporado.** 2016. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MAYERCSIK, N. P. *et al.* **A probabilistic technique for entrainment air void analysis in hardened concrete.** Cement And Concrete Research. v 59, p. 16-23. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.01.023>

MCCARTER, W.J.; FORDE, M.; WHITTINGTON, H.W.; SIMONS, T. **Electrical resistivity characteristics of air-entrained concrete**, Proc. Inst. Civ. Eng. Pt. 2 75, p. 123–127, 1983.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 745 p. Versão atualizada, com base na quarta versão em inglês.

OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. **Durabilidade do Concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. São Paulo: Ibracon, 2014. 606 p. Tradução de Oswaldo Cascudo e Helena Carasek.

PDCA ENGENHARIA. **Residencial Monte Hebron**. 2014. Disponível em: <<http://www.pdcaeng.com.br/empreendimento/residencial-monte-hebron.aspx>>. Acesso em: 15 out. 2015.

PIEKARCZYK, B. L. **The type of air-entraining and viscosity modifying admixtures and porosity and frost durability of high performance self-compacting concrete**, Construction and Building Materials, v. 40, p. 659–671, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.032>

PREFEITURA DE UBERLÂNDIA. **Prefeitura assina contrato para construção de mais 5.200 casas**. Brasil, 2014. Disponível em: <[http://www.uberlandia.mg.gov.br/2014/noticia/8354/prefeitura\\_assina\\_contrato\\_para\\_construcao\\_de\\_mais\\_5\\_200\\_casas.html](http://www.uberlandia.mg.gov.br/2014/noticia/8354/prefeitura_assina_contrato_para_construcao_de_mais_5_200_casas.html)>. Acesso em: 01 out. 2015.

PREFEITURA DE UBERLÂNDIA. **Prefeitura lança 1.440 casas no Faixa II do Minha Casa, Minha Vida**. 2015. Disponível em: <[http://www.uberlandia.mg.gov.br/2014/noticia/10076/prefeitura\\_lanca\\_1\\_440\\_casas\\_no\\_faixa\\_ii\\_do\\_minha\\_casa\\_minha\\_vida.html](http://www.uberlandia.mg.gov.br/2014/noticia/10076/prefeitura_lanca_1_440_casas_no_faixa_ii_do_minha_casa_minha_vida.html)>. Acesso em: 14 out. 2015.

RAMAMURTHY K, Kunhanandan Nambiar EK, Indu Siva Ranjani G. **A classification of studies on properties of foam concrete**. Cem Concr Compos 2009; 31(6):388–96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>

RIBEIRO, A. M. **Nota Técnica: Déficit habitacional no Brasil**: Anos 2011 e 2012. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro, 2014. 17 p. Disponível em: <<http://www.fjp.mg.gov.br/index.php/docman/cei/deficit-habitacional/360-nota-tecnica-deficit-habitaci>>. Acesso em: 08 out. 2015.

RILEM, TC 56-MHM. **CPC-18 – Measurement of hardened concrete carbonatation depth**. TC-56 MHM Hidrocarbon materials. Rilem Publications SARL, v. 21, p. 453-455. ISSN 1359-5997.

RODOBENS. Rodobens Negócios Imobiliários. **Residencial Terra Nova Uberlândia**. Disponível em: <<http://rodobensimoveis.com.br/mg/uberlandia/casas-de-2-e-3-dorms/terra-nova-uberlandia/>>. Acesso em: 15 out. 2015.

SALOMÃO, M. C. **Ensaio acelerado de carbonatação do concreto.** Artigo apresentado à Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia.

SILVA, N. G. *et al.* **Efeitos do ar incorporado nas propriedades do estado endurecido em argamassas de cimento e areia.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51. Curitiba: Ibracon, 2009.

SOUZA, Angela Cristina Alves Guimarães de. **Análise comparativa de custos de alternativas tecnológicas para construção de habitações populares.** 2009. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2009.

SUSTENTABILIDADE. **A sustentabilidade das edificações de madeira.** 2012. Disponível em: <<http://madeirambiente.com.br/sustentabilidade-edificacoes-madeira/>>. Acesso em: 08 out. 2015

TOUTANJI, H.A. **The influence of air entrainment on the properties of silica fume concrete,** Adv. Cem. Res. 10 (3), p. 135–139, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1680/adcr.1998.10.3.135>

VUOLO, J.H. **Fundamentos da teoria dos erros.** 2.ed. São Paulo, Edgar Blüncher, 1996. 249p.

WONG, H.S. *et al.* **Effect of entrained air voids on the microstructure and mass transport properties of concrete.** Cement and concrete research, v41, p. 1067-1077, 2011.

WOOD FRAME. Casas populares construídas em Wood frame. Disponível em: <<http://equipedeobra.pini.com.br/construcao-reforma/62/habitacao-popular-em-madeira-construtora-reduziu-em-15-o-292701-1.aspx>>. Acesso em 10/11/2015

ZIVICA V.; BAJZA A.; **Acidic attack of cement-based materials - a review Part 2.** Factors of rate of acidic attack and protective measures Constr Build Mater 16 (2002) 215-222.