

**Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e
Infraestrutura**

Débora Marx de Almeida

**ANÁLISE DE VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA
CARBONATAÇÃO NATURAL DE AMOSTRAS DE
LABORATÓRIO E DE ESTRUTURAS DE CONCRETO**

Porto Alegre
novembro 2019

DÉBORA MARX DE ALMEIDA

**ANÁLISE DE VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA
CARBONATAÇÃO NATURAL DE AMOSTRAS DE
LABORATÓRIO E DE ESTRUTURAS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
PhD pela University of Leeds
Orientador

Profa. Ângela Gaio Graeff
PhD pela University of Sheffield
Coorientador

Porto Alegre
2019

DÉBORA MARX DE ALMEIDA

**ANÁLISE DE VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA
CARBONATAÇÃO NATURAL DE AMOSTRAS DE
LABORATÓRIO E ESTRUTURAS DE CONCRETO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa Desempenho, e aprovada em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 2019

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
PhD pela University of Leeds
Orientador

Profa. Ângela Gaio Graeff
PhD pela University of Sheffield
Coorientadora

Profa. Ângela Borges Masuero
Coordenadora do PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Mauricio Mancio (Unisinos)
Dr. pela University of California

Prof.a Cristiane Pauletti (ULBRA)
Dr.a pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.a Ana Carolina Badalotti Passuello (UFRGS)
Dr.a pela Universitat Rovira i Virgili

Aos meus avôs, Ivelise e Assis.

AGRADECIMENTOS

A Engenharia é uma área de estudo famosa por sua frieza e calculismo, entretanto durante a realização deste trabalho tive o prazer de conviver com alguns profissionais cuja dedicação e paixão pela área são uma lição de vida. A maneira o prof. Luiz Carlos e a prof. Ângela acreditam que o ensino e a pesquisa podem transformar o mundo e as pessoas é simplesmente encantadora. Agradeço aos dois não só por toda ajuda durante a realização do presente trabalho, mas também por servirem de exemplo de professores incansáveis em busca do melhor para os seus alunos. Agradeço aos meus professores da graduação e da pós-graduação por todo conhecimento, assim como à UFRGS, ao LEME e ao LAMTAC por fornecer todos os materiais e equipamentos necessários para a realização da pesquisa.

Agradeço a banca examinadora pelas contribuições que foram essenciais para a pesquisa e à prof. Possan pela disponibilidade em me auxiliar na utilização do seu trabalho.

Agradeço à equipe do NAE (Núcleo de Assessoria Estatística), Camila, Daniella, Juliana e Luciana por trazer a luz no fim do trabalho em uma manhã tão agradável.

Agradeço à toda equipe da SINFRAEE pela disponibilidade nas minhas subidas ao telhado da Escola de Engenharia, em especial ao Flávio e ao Elmo que não mediram esforços para que desse tudo certo sempre.

Agradeço a toda equipe do LAMTAC, em especial o Airton por deixar as tardes de ruptura mais divertidas.

Agradeço à toda a equipe do LEME por todo auxílio, em especial os bolsistas de iniciação científica que além de toda ajuda foram um grande ombro amigo. À Carol M. e à Gabi, que tornaram as tardes de concretagem mais agradáveis. Ao Gabriel, Loani, Leandro, João, Heloísa, Felipe, Paloma, Risbacik, Felipe, Joana, Juliana e Lucas por todas as “ajudinhas” seja para subir no telhado ou para limpar algumas formas. Ao Victor por estar quase sempre disponível para tudo e ao Ronaldo que me acompanhou do início ao fim em todas as etapas do trabalho sempre com muito bom humor e que se tornou um grande amigo. Aos meus colegas de sala, Luciane, Lucas, Kássio, Jacinto e Dani pelas conversas, companhia e auxílio e em especial a Carol que sempre arranja um jeito especial de ajudar todos no laboratório.

Agradeço aos meus amigos que surgiram durante a realização do trabalho e aqueles que já estavam por aqui antes. Aos eternos amigos da Engenharia, Deise, Gabriela, Karina e Tiago por aguentar mais uma etapa de reclamações. Às amigas mais antigas ainda Eliza e Barbara por todo apoio e momentos de descontração. As meninas da sustentabilidade Gabriela, Isadora e Janaine por trazer uma leveza e tranquilidade que só a salinha de vocês consegue passar tão bem.

Por fim agradeço a minha família, em especial meus pais Thales e Claudia que me forneceram tudo e mais um pouco para que eu possa escolher meus rumos no meu tempo. Ao meu namorado Alexandre por tudo. E aos meus avôs Ivelise e Assis cuja presença física infelizmente não tenho mais, mas o amor que recebi guardo para sempre.

“As coisas desmoronam,
mas nada se parte como um coração”

(Mark Ronson et al.)

RESUMO

ALMEIDA, D. M. **Análise das variáveis que influenciam na carbonatação natural de amostras de laboratório e estruturas de concreto.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

Estudar fenômenos de degradação permite ampliar o conhecimento acerca da durabilidade das estruturas de concreto armado. A corrosão de armaduras é tida como uma das principais manifestações patológicas que atingem as estruturas de concreto armado. Este processo pode ser ocasionado pela ação de cloretos ou pela carbonatação. A carbonatação é a reação do gás carbônico da atmosfera com alguns compostos do cimento, e o fenômeno acaba por reduzir o pH do concreto fazendo com que este perca sua propriedade de funcionar como uma barreira química contra agentes de degradação. Diversos fatores influenciam no comportamento da carbonatação, dos quais destacam-se: relação água/cimento, tipo e quantidade de cimento, adições, umidade relativa do ar e teor de CO₂ no ambiente. A presente pesquisa tem como objetivo relacionar o comportamento da carbonatação em amostras elaboradas em laboratório (que permitem um maior controle sobre as características do concreto) e em estruturas existentes (com longos períodos de exposição). Foram adotadas três relações água/cimento (0,55; 0,60 e 0,65), dois tipos de cimento (CPIV e CPV) e um traço fixo (1:3:4) para as amostras. Além destas variáveis, foram escolhidos dois locais (Campus Centro e Campus do Vale da UFRGS) e duas condições de exposição: protegido e exposto à chuva. Os dados de carbonatação das amostras foram coletados durante o período de exposição de 330 dias. Foram escolhidas duas estruturas para medição da profundidade de carbonatação, o Prédio da Escola de Engenharia no Campus Centro e o Centro de Biotecnologia no Campus do Vale. Optou-se por medir a carbonatação em dois pilares de cada prédio (um exposto e um protegido da chuva). Para possibilitar a comparação entre os resultados de carbonatação das amostras de laboratório e das edificações foram utilizados dois métodos: o primeiro consiste no modelo de previsão de carbonatação desenvolvido por Possan (2010) e o segundo uma equação simplificada cujo coeficiente foi determinado com base nos dados obtidos para as amostras. Os dados da carbonatação das amostras foram analisados estatisticamente e concluiu-se que as características do concreto (relação água/cimento e tipo de cimento) foram mais significativas para a carbonatação do que as condições ambientais (local e condição de exposição). O ruído experimental teve uma influência significativa na variabilidade dos resultados experimentais. Os elementos ensaiados no Prédio da Escola de Engenharia não resultaram em valores significativos para a profundidade de carbonatação, portanto não foi realizado o comparativo com as amostras do Campus Centro. Para o Centro de Biotecnologia foi calculado um intervalo de confiança para os resultados de profundidade de carbonatação com um nível de confiança de 95%. Este intervalo foi comparado com os resultados obtidos para a carbonatação através do Modelo de Possan (2010) e da equação simplificada. O comparativo com o Modelo de Possan (2010) resultou que um concreto com cimento CPIV e relação água/cimento 0,55 é o que mais se assemelha ao resultado de carbonatação obtido para o pilar coberto do Centro de Biotecnologia. Entretanto, a análise utilizando a equação simplificada não apontou para nenhuma combinação que se aproxime das características dos pilares estudados.

Palavras-chave: Durabilidade. Concreto Armado. Carbonatação.

ABSTRACT

ALMEIDA, D. M. **Analysis of the variables that influence the natural carbonation of laboratory specimens and concrete structures**. 2019. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, Engineering School, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

Studying degradation phenomena allows us to broaden our knowledge about the durability of reinforced concrete structures. Reinforcement corrosion is considered one of the main pathological manifestations that affect reinforced concrete structures. This process can be caused by the action of chlorides or by carbonation. Carbonation is the reaction of carbon dioxide from the atmosphere with some cement composites, responsible for reducing the pH of the concrete causing it to lose its property of functioning as a chemical barrier to degradation agents. There are several factors that influence the carbonation behavior, of which we can highlight: water-cement ratio; type and quantity of cement, additions, relative humidity and CO₂ level in the atmosphere. This research aims to relate the depth of carbonation obtained for laboratory specimens (which allow control over the characteristics of concrete) and the carbonation of existing structures (with long exposure time). Three water-cement ratios (0,55, 0,60 and 0,65), two types of cement (CPIV and CPV) and one composition (1:3:4) were used to produce the laboratory samples. In addition to these variables, two exposure locations (Campus Centro and Campus do Vale) and two exposure conditions (protected and unprotected from rain) were chosen. Carbonation depth data were collected during the exposure period of 330 days. Two structures were chosen to measure the carbonation depth: the Engineering School building at Campus Centro and the Biotechnology Center at Campus do Vale. The carbonation depth was measured in two columns of each building (one exposed and one protected from the rain). Two methods were used to enable the comparison between the carbonation's values of the laboratory samples and the structures: the first one is the carbonation prediction model developed by Possan (2010) and the other is a simplified equation whose coefficient was determined based on the carbonations data obtained from the samples. The carbonation data from the samples were statistically analyzed, and it was concluded that the concrete characteristics (water-cement ration and cement type) were more significant for carbonation than the environmental conditions (location and exposure condition). Experimental error also had a significant influence on the variability of experimental results. The structural elements in the Engineering School building did not result in significant values for the carbonation depth, so the comparison with the specimens from Campus Centro was not made. For the Biotechnology Center a confidence interval was calculated for carbonation depth results with a confidence level of 95%. This interval was compared with the results obtained for carbonation through the Possan Model (2010) and the simplified equation. The comparison with the Possan Model (2010) pointed that the concrete with cement type CPIV and water-cement ratio 0.55 is the most similar to the carbonation depth of the protected column of the Biotechnology Center. However, the analysis using the simplified equation did not point to any combination that approximates the characteristics of the studied columns.

Keywords: Durability. Reinforced Concrete. Carbonation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação entre a profundidade de carbonatação das amostras de laboratório e das estruturas existentes	21
Figura 2 – Evolução conceitual do projeto das estruturas de concreto	25
Figura 3 – Representação do avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto	36
Figura 4 – Etapas da pesquisa	49
Figura 5 – Curva granulométrica do agregado miúdo.....	52
Figura 6 – Curva granulométrica do agregado graúdo	53
Figura 7 – Água na superfície dos corpos de prova	55
Figura 8 – Corpos de prova de concreto dispostos no prédio da Escola de Engenharia descobertos (a) e abrigados da chuva (b)	56
Figura 9 – Corpos de prova de concreto dispostos no prédio do Centro de Biotecnologia no Campus do Vale descobertos (a) e abrigados da chuva (b) ...	56
Figura 10 – Umidade relativa do ar para o período de exposição das amostras	57
Figura 11 – Campus do Vale (a) e Campus Centro (b)	58
Figura 12 – Mapa da localização dos Campi da UFRGS na cidade de Porto Alegre	58
Figura 13 – Localização do Centro de Biotecnologia no Bloco IV do Campus do Vale (a) e prédio do Centro de Biotecnologia (b)	59
Figura 14 – Terraplenagem do Setor IV	60
Figura 15 – Prédio da Escola de Engenharia	60
Figura 16 – Ensaio de medição de profundidade de carbonatação em uma estrutura	63
Figura 17 – Ensaio de medição de profundidade de carbonatação em uma amostra com indicador de pH	63
Figura 18 – Comparação múltipla das médias do fator água/cimento em relação à resistência à compressão para as amostras com cimento CPV (a) e para as amostras com cimento CPIV (b)	68
Figura 19 – Comparação múltipla das médias do fator água/cimento em relação ao índice de vazios para as amostras produzidas com cimento CPV	74
Figura 20 – Comparação múltipla das médias do fator água/cimento em relação à absorção para as amostras produzidas com cimento CPV	74
Figura 21 – Comparação múltipla das médias do fator água/cimento em relação à massa específica real das amostras produzidas com cimento CPV	74
Figura 22 – Avanço da frente de carbonatação nas amostras com cimento CPV localizadas no Campus Centros e cobertas (a) localizadas no Campus Centro e descobertas (b) localizadas no Campus do Vale e cobertas (c) e localizadas no Campus do vale e descobertas (d)	77

Figura 23 – Avanço da frente de carbonatação nas amostras com cimento CPIV localizadas no Campus Centros e cobertas (a) localizadas no Campus Centro e descobertas (b) localizadas no Campus do Vale e cobertas (c) e localizadas no Campus do vale e descobertas (d)	78
Figura 24 – Comparação múltipla de médias do fator Relação água/cimento em relação à profundidade de carbonatação	82
Figura 25 – Comparação múltipla de médias das interações dos fatores Condição de exposição (Fator B) e Relação água/cimento (Fator D)	82
Figura 26 – Pilares do Centro de Biotecnologia escolhidos para a realização dos ensaios de profundidade de carbonatação protegido da chuva (a) e exposto à chuva (b)	83
Figura 27 – Ensaio de medição de profundidade de carbonatação em uma viga no Prédio Novo da Escola de Engenharia	85
Figura 28 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus Centro com cimento CPV e $a/c = 0,55$	87
Figura 29 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus Centro com cimento CPV e $a/c = 0,60$	88
Figura 30 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus Centro com cimento CPV e $a/c = 0,65$	88
Figura 31 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus do Vale com cimento CPV e $a/c = 0,55$	89
Figura 32 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus do Vale com cimento CPV e $a/c = 0,60$	89
Figura 33 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus do Vale com cimento CPV e $a/c = 0,65$	90
Figura 34 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus Centro com cimento CPIV e $a/c = 0,55$	90
Figura 35 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus Centro com cimento CPIV e $a/c = 0,60$	91
Figura 36 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus Centro com cimento CPIV e $a/c = 0,65$	91
Figura 37 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus do Vale com cimento CPIV e $a/c = 0,55$	92

Figura 38 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus do Vale com cimento CPIV e $a/c = 0,60$	92
Figura 39 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus do Vale com cimento CPIV e $a/c = 0,65$	93
Figura 40 – Processo de cálculo de k e k'	95
Figura 41 – Previsão da carbonatação calculada utilizando o modelo proposto por Possan (2010) para o Campus Centro condição protegida da chuva	97
Figura 42 – Previsão da carbonatação calculada utilizando a equação simplificada para o Campus Centro condição protegida da chuva	97
Figura 43 – Previsão da carbonatação calculada utilizando o modelo proposto por Possan (2010) para o Campus Centro condição desprotegida da chuva	98
Figura 44 – Previsão da carbonatação calculada utilizando a equação simplificada para o Campus Centro condição desprotegida da chuva	99
Figura 45 – Previsão da carbonatação calculada utilizando o modelo proposto por Possan (2010) para o Campus do Vale condição protegida da chuva	100
Figura 46 – Previsão da carbonatação calculada utilizando a equação simplificada para o Campus do Vale condição protegida da chuva	100
Figura 47 – Previsão da carbonatação calculada utilizando o modelo proposto por Possan (2010) para o Campus do Vale condição protegida da chuva	101
Figura 48 – Previsão da carbonatação calculada utilizando a equação simplificada para o Campus do Vale condição desprotegida da chuva	102
Figura 49 – Comparação entre a carbonatação do pilar protegido da chuva do Centro de Biotecnologia e os dados de carbonatação calculados por Possan (2010)	104
Figura 50 – Comparação entre a carbonatação do pilar exposto à chuva do Centro de Biotecnologia e os dados de carbonatação calculados por Possan (2010)	105
Figura 51 – Comparação entre a carbonatação do pilar protegido da chuva do Centro de Biotecnologia e os dados de carbonatação calculados pela equação simplificada	106
Figura 52 – Comparação entre a carbonatação do pilar desprotegido da chuva do Centro de Biotecnologia e os dados de carbonatação calculados pela equação simplificada	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais fatores que influenciam o processo de carbonatação do concreto..	38
Tabela 2 – Coeficiente do modelo em função das características do concreto e das condições ambientais	46
Tabela 3 – Coeficientes do modelo em função das condições de exposição	47
Tabela 4 – Fatores controláveis da pesquisa	49
Tabela 5 – Composição química dos cimentos adotados na pesquisa	51
Tabela 6 – Características granulométricas do agregado miúdo	52
Tabela 7 – Características granulométricas do agregado graúdo	53
Tabela 8 – Propriedades do aditivo superplastificante	54
Tabela 9 – Concentração de CO ₂ nos locais de interesse da pesquisa	57
Tabela 10 – Variáveis de resposta de interesse da pesquisa	61
Tabela 11 – Resultados para resistência à compressão aos 28 dias	66
Tabela 12 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão para as amostras com cimento CPV	67
Tabela 13 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão para as amostras com cimento CPIV	67
Tabela 14 – Resultados para o ensaio de abatimento	69
Tabela 15 – Resultados para o ensaio de ultrassom	70
Tabela 16 – Resultados para o ensaio de determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica	71
Tabela 17 – Análise de variância dos resultados de índice de vazios das amostras com cimento CPV	72
Tabela 18 – Análise de variância dos resultados de absorção das amostras com cimento CPV	72
Tabela 19 – Análise de variância dos resultados de massa específica real das amostras com cimento CPV	72
Tabela 20 – Análise de variância dos resultados de índice de vazios das amostras com cimento CPIV	72
Tabela 21 – Análise de variância dos resultados de absorção das amostras com cimento CPIV	73
Tabela 22 – Análise de variância dos resultados de massa específica real das amostras com cimento CPIV	73
Tabela 23 – Datas de realização dos ensaios de profundidade de carbonatação	75
Tabela 24 – Análise de variância para os resultados de profundidade de carbonatação das amostras de laboratório	80

Tabela 25 – Resultados de profundidade de carbonatação dos pilares do Centro de Biotecnologia	84
Tabela 26 – Diferença em dias entre as concretagens das amostras de laboratório	87
Tabela 27 – Cálculo de k e k' para as amostras com cimento CPV expostas no Campus Centro e protegidas da chuva.....	96
Tabela 28 – Intervalo de confiança pra os valores de profundidade de carbonatação dos pilares do Centro de Biotecnologia	103

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Risco de deterioração da estrutura	27
---	----

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c – Relação água/cimento

ad – Teor de adição pozolânica no concreto

Al₂O₃ – Alumina

ANOVA – Análise de Variância

Ca – Cálcio

CaCO₃ – Carbonato de Cálcio

Ca(OH)₂ – Hidróxido de Cálcio

CaO – Óxido de Cálcio

CO₂ – Gás Carbônico ou Dióxido de Carbono

CP – Corpo de Prova

CPIV – Cimento Portland pozolânico

CPV-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

f_c – Resistência característica à compressão axial do concreto

HCO₃ – Bicarbonato

H₂O – Água

H₂S – Gás Sulfídrico

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

k – Coeficiente de carbonatação

k' – Coeficiente inicial de carbonatação

k_c – Fator variável referente ao tipo de cimento utilizado

k_{ce} – Fator variável referente à exposição à chuva, em função das condições de exposição da estrutura

k_{CO_2} – Fator variável referente ao teor de CO_2 no ambiente, em função do tipo de cimento adotado

k_{fc} – Fator variável referente à resistência à compressão axial do concreto em função do tipo de cimento empregado

LAMTAC – Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

LEME – Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais

MgO – Óxido de magnésio

MMC – Método de Monte Carlo

MQ – Média quadrada

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

NBR NM - Norma Brasileira Regulamentadora Norma MERCOSUL

NGL – Número de graus de liberdade

OH – Hidroxila

pH – Potencial Hidrogeniônico

pm – Profundidade Média

RILEM – Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et Matériaux

RuO_2 – Óxido de Rutênio

SiO_2 – Quartzo

SQ – Soma quadrada

SO₂ – Dióxido de Enxofre

t – Tempo

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UR – Umidade Relativa do ar

VPU – Velocidade de Propagação do Pulso Ultrassônico

VU – Vida Útil

VUP – Vida Útil de Projeto

y – Profundidade de carbonatação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	17
1.2 QUESTÃO DE PESQUISA	19
1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA	19
1.4 ESTRATÉGIA DE PESQUISA	20
1.5 LIMITAÇÕES	21
1.6 DELINEAMENTO DO TRABALHO	22
2 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL	24
3 CORROSÃO DE ARMADURAS E CARBONATAÇÃO DO CONCRETO	31
3.1 CORROSÃO DE ARMADURAS	31
3.2 CARBONATAÇÃO DO CONCRETO	33
3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A CARBONATAÇÃO DO CONCRETO	38
3.4 MODELOS DE CARBONATAÇÃO	43
4 ETAPA EXPERIMENTAL	48
4.1 CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS EM LABORATÓRIO	49
4.1.1 Descrição dos materiais	50
4.1.1.1 Cimento	50
4.1.1.2 Agregado Miúdo	51
4.1.1.3 Agregado Graúdo	52
4.1.1.4 Aditivo	53
4.1.2 Execução dos Corpos de Prova	54
4.1.3 Condições ambientais	56
4.2 ESTRUTURAS EXISTENTES	57
4.3 PROGRAMAS DE ENSAIO	61
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	65
5.2 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	75
5.2.1 Profundidade de carbonatação das amostras de laboratório	75
5.2.2 Profundidade de carbonatação das estruturas existentes	83
6. ANÁLISE ESTATÍSTICA	86
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
REFERÊNCIAS	112

APÊNDICE A – Dados de profundidade de carbonatação das amostras de laboratório	116
APÊNDICE B – Comparativo entre valores de profundidade de carbonatação obtidos experimentalmente para as amostras e calculados pelo Modelo de Possan (2010)	124
APÊNDICE C – Cálculo de k e k' para todas as condições estudadas	128
APÊNDICE D – Valores de carbonatação calculados pelo Modelo de Possan (2010) e pela equação simplificada	133

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo encontra-se a motivação para a presente pesquisa. Primeiramente é realizada a apresentação do tema e sua importância dentro da Engenharia Civil. Em seguida são apresentadas as diretrizes da pesquisa: a questão de pesquisa; os objetivos estabelecidos; as limitações encontradas e o delineamento do trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Apesar de sua aparência robusta, as construções de concreto armado estão sujeitas à ação do tempo. O grande avanço na tecnologia do concreto nas últimas décadas permitiu que fossem projetadas e erguidas estruturas com grande capacidade de carga, entretanto a demanda por estruturas com capacidade para manter sua integridade em longos períodos de tempo é uma preocupação relativamente recente e muitas vezes negligenciada na Engenharia. Como resultado, é possível observar altos custos com manutenção e reparo nas estruturas atuais. Estas despesas nem sempre são arcadas pelos responsáveis pela construção, e geralmente causam prejuízos aos usuários. Estes efeitos podem ser observados em pequenas edificações particulares até obras públicas de infraestrutura de grande porte.

Também associada à questão da durabilidade surge outra demanda ainda mais recente para a Engenharia: a busca por alternativas mais sustentáveis dentro da construção civil. Segundo Hooton e Bickley (2014) para reduzir a pegada de carbono do concreto, a solução mais efetiva passa por planejar a durabilidade da estrutura. Ainda de acordo com os autores, medidas ambientalmente mais eficientes que aquelas relacionadas aos materiais (redução do clínquer, otimização da dimensão do agregado ou a utilização de componentes cimentícios substitutos) estão relacionadas com controle, planejamento, e a correta definição dos requisitos de desempenho.

Portanto, além de financeiramente inaceitável, não é ambientalmente correto edificações que foram construídas para operar durante meio século, encontrarem-se degradadas em poucos anos de uso. A ausência de determinadas especificações e os descuidos com a execução intensificam os defeitos das construções as deixando mais vulneráveis aos processos de degradação. Por

outro lado, os agentes agressivos responsáveis pelo desgaste de uma estrutura são inevitáveis e o estilo de vida atual, com grande aumento da industrialização e a utilização de fontes de energia poluentes, intensifica a presença destes no ambiente.

Existem diversos estudos que visam compreender o comportamento dos agentes de degradação e como estes atuam para reduzir a vida útil das obras da construção civil (por exemplo, HELENE, 1993; SILVA FILHO, 1994 PAPADAKIS; VAYENAS, FARDIS, 1989). O grande desafio atual da Engenharia é extrapolar este conhecimento empírico e científico para os longos períodos nos quais são projetadas as estruturas de concreto armado. Uma das abordagens adotada para superar este obstáculo é a utilização de análises probabilísticas, que possibilitam considerar as relevantes incertezas, inerentes aos processos de degradação, que não podem ser ignoradas na busca por resultados realistas. Agopyan (2019) ressalta que apesar de muitos classificarem a Engenharia como uma ciência exata, variabilidade e incerteza estão sempre presentes nesta área devido às complexas relações entre os materiais, métodos e processos e a natureza.

Dentre os diversos mecanismos de degradação conhecidos, o presente trabalho foca-se no processo de carbonatação que ocorre nas estruturas de concreto. Este fenômeno pode ser considerado um exemplo de porque o desempenho de uma estrutura não deve ser associado única e exclusivamente à sua capacidade de resistir às cargas de projeto. Sabe-se que a carbonatação do concreto aumenta vagamente a resistência da peça (NEVILLE; BROOKS, 2013; PAPADAKIS, VAYENAS; FARDIS, 1989), entretanto estes pequenos ganhos de capacidade portante não representam nenhuma vantagem, principalmente quando comparados aos problemas associados à durabilidade que o processo pode acarretar.

Pode-se antecipar que a carbonatação, assim como a maioria dos processos de deterioração, está profundamente relacionada com o ambiente no qual a estrutura está inserida e as características dos materiais que a compõem. O gás carbônico presente, cada vez em maiores quantidades na atmosfera, é um dos grandes responsáveis por este fenômeno que geralmente atinge estruturas em regiões urbanas e/ou industriais. Falhas na execução das estruturas e o desrespeito às recomendações estabelecidas nas normas de projeto intensificam o aparecimento desta anomalia.

Existem vários desafios envolvidos no estudo da carbonatação. Por se tratar de um fenômeno lento, foram desenvolvidos ensaios acelerados que possibilitam simular este longo processo em

períodos menores de tempo. Entretanto, não existe um consenso em relação a quanto o tempo de ensaio acelerado corresponde na vida real de uma estrutura. Outro limitador é a ausência de uma padronização do ensaio, que acaba por dificultar ou até mesmo impossibilitar um comparativo entre os resultados de diferentes estudos sobre o tema. Por outro lado, a utilização de dados de profundidade de carbonatação de estruturas existentes para fins de pesquisa fica limitada à disponibilidade de informações sobre o concreto que compõe a edificação. Dados referentes ao traço, à relação água/cimento, ao tipo de cimento utilizado, entre outros, nem sempre foram documentados ou estão disponíveis, e são essenciais para o estudo do fenômeno.

O presente trabalho tem o propósito de ampliar os conhecimentos sobre a carbonatação e contribuir para a questão da durabilidade das estruturas. Desta maneira, estabeleceu-se como objetivo utilizar o conhecimento já disponível sobre este processo para analisar o comportamento da frente de carbonatação em corpos de prova moldados em laboratório e comparar estes resultados com os obtidos para estruturas existentes em dois microclimas distintos na cidade de Porto Alegre. Pretende-se utilizar uma abordagem estatística para considerar as incertezas e variabilidades que estão presentes na pesquisa.

O intuito é utilizar estruturas existentes, que carregam consigo valiosos resultados de anos de exposição a agentes agressivos, e amostras de laboratório cujo controle na execução e disponibilidade de informações facilitam a pesquisa. Desta forma pretende-se colaborar com a manutenção das estruturas e com o compromisso de obter estruturas mais duráveis (e consequentemente, mais sustentáveis) na construção civil.

1.2 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: é possível relacionar os resultados de profundidade de carbonatação obtidos para amostras de laboratório com aqueles coletados de estruturas existentes através de uma análise estatística?

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo principal da presente pesquisa é verificar se é possível relacionar dados de profundidade de carbonatação de edificações de concreto e de corpos de prova de concreto elaborados em laboratório. O intuito é verificar a possibilidade de se utilizar um ensaio simples,

como o de medição de profundidade de carbonatação, para estimar propriedades de uma estrutura.

Desta maneira, definiram-se os objetivos específicos do trabalho como sendo:

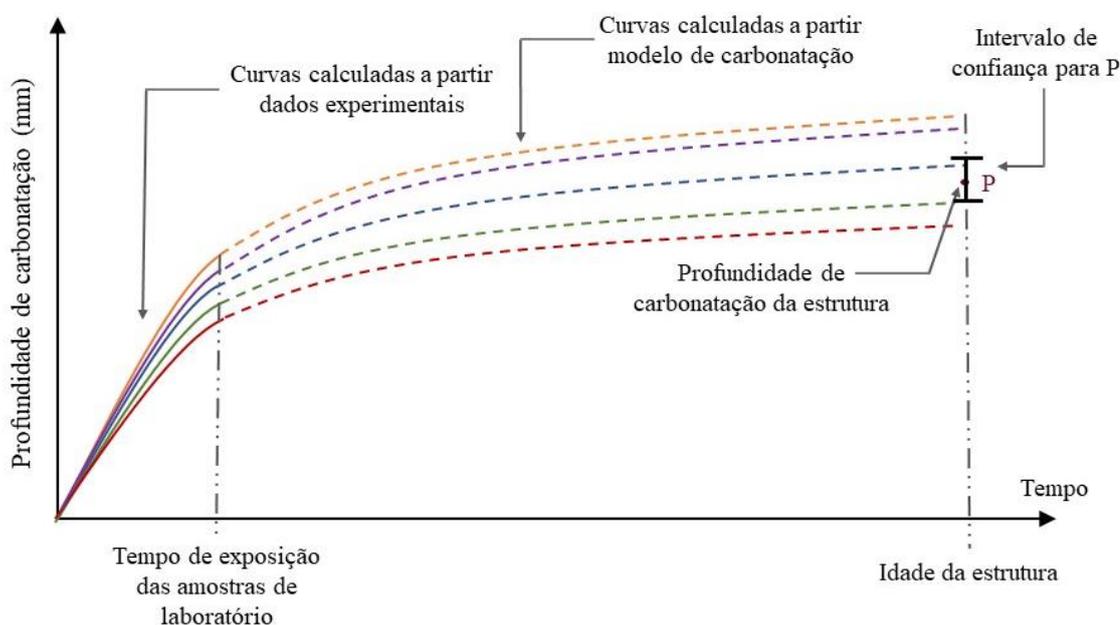
- a) acompanhar a evolução da carbonatação natural de corpos de prova moldados em laboratório com diferentes relações água/cimento e diferentes tipos de cimento em dois microclimas distintos na cidade de Porto Alegre.
- b) coletar dados de carbonatação de estruturas existentes para dois microclimas distintos na cidade de Porto Alegre.
- c) simular o comportamento do avanço da frente de carbonatação utilizando como base um modelo de previsão e os dados de profundidade de carbonatação coletados.

1.4 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

O presente trabalho se propôs a coletar dados de profundidade de carbonatação de duas estruturas existentes em dois microclimas distintos na cidade de Porto Alegre e de corpos de prova de laboratório localizados nos mesmos ambientes das edificações. Estas amostras apresentavam características distintas: foram adotados três valores para a relação água/cimento (0,55; 0,60 e 0,65) e dois tipos de cimento (CPIV e CPV), entretanto, manteve-se o traço de 1:3:4 para todos os corpos de prova, visando limitar o número de amostras.

Após uma análise estatística dos dados coletados foi estabelecida uma relação entre os corpos de prova moldados em laboratório e as estruturas escolhidas. O objetivo era verificar a possibilidade do valor encontrado para a profundidade de carbonatação das estruturas existentes estar relacionado a alguma das curvas que modelam o comportamento da frente de carbonatação dos corpos de prova elaborados em laboratório. Lembrando que as variações nas propriedades das amostras e nas condições de exposição geram diferentes comportamentos para a carbonatação e, conseqüentemente, diferentes curvas para representar o fenômeno. A Figura 1 ilustra esta proposta.

Figura 1 – Relação entre a profundidade de carbonatação das amostras de laboratório e das estruturas existentes.



Para o período de exposição das amostras, as curvas que representam o avanço da frente de carbonatação são traçadas com base nos dados coletados (linhas contínuas do gráfico da Figura 1). Para o período após o tempo de exposição até a idade das estruturas foram utilizados dois métodos para representar a evolução do fenômeno nos corpos de prova (linhas tracejadas), um deles o modelo de carbonatação proposto por Possan (2010) e o outro uma equação simplificada baseada na lei de Fick. O objetivo final era testar a possibilidade de relacionar os dados de profundidade de carbonatação das estruturas com aqueles coletados para as amostras (verificar a possibilidade de alguma das curvas que modelam o avanço da frente de carbonatação pertencer ao intervalo de confiança do ponto P).

1.5 DELIMITAÇÕES

As delimitações do presente trabalho estão relacionadas com a parte experimental da pesquisa. Uma das delimitações refere-se à utilização de apenas um único traço, dois tipos de cimento e três relações água/cimento nas amostras elaboradas para o desenvolvimento da pesquisa com o objetivo de limitar o número de corpos de prova produzidos.

O presente trabalho delimitou-se à utilização de valores altos para a relação água/cimento (0,55, 0,60 e 0,65) para possibilitar a obtenção de dados de profundidade de carbonatação dentro do

tempo estabelecido para a pesquisa. Outro motivo para esta escolha é viabilizar a comparação entre as amostras de laboratório e as estruturas existentes, que por serem mais antigas, possivelmente foram concebidas com valores maiores para a relação água/cimento.

Outra delimitação está associada ao tempo de exposição das amostras, por se tratar de um fenômeno lento, as pesquisas de carbonatação natural costumam adotar longos períodos de exposição. Na presente pesquisa foi adotado um período de 330 dias de exposição.

E por fim, a limitação da coleta de dados nas estruturas existentes, por se tratar de um ensaio destrutivo foram realizados os ensaios em apenas seis pontos da fachada das estruturas analisadas.

1.6 DELINEAMENTO DO TRABALHO

A presente pesquisa está estruturada em sete capítulos. A primeira parte trata-se de um capítulo introdutório, onde foram apresentadas a contextualização e justificativa do tema de pesquisa, e foram discutidas as diretrizes do trabalho como questão de pesquisa, objetivos, limitações e a estrutura do trabalho. Os dois capítulos seguintes são frutos da revisão bibliográfica realizada para adquirir o conhecimento necessário para a elaboração da presente pesquisa. Foram utilizados como referência estudos sobre durabilidade, degradação de estruturas, vida útil e principalmente pesquisas que visam compreender e modelar o fenômeno de carbonatação do concreto armado, entre outros.

No capítulo 2 são abordadas questões relacionadas a durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado. Neste mesmo capítulo são apresentados e discutidos conceitos da literatura referente ao assunto. O capítulo 3 apresenta os resultados de uma revisão da literatura acerca do tema de corrosão de armaduras e carbonatação do concreto. Por se tratar do tema principal da pesquisa, buscou-se dissertar sobre o fenômeno de maneira detalhada e neste capítulo também são apresentados os principais fatores que influenciam este processo de degradação e um breve resumo sobre modelos de carbonatação, destacando o modelo adotado na pesquisa.

O capítulo 4 refere-se à parte experimental da pesquisa. Neste é apresentado o plano experimental, onde foram definidas as etapas da pesquisa experimental, as variáveis adotadas, os materiais utilizados e os ensaios executados. Em seguida, no capítulo 5 estão apresentados

os resultados obtidos para os ensaios descritos no capítulo 4, as análises estatísticas destes valores experimentais e uma discussão sobre os dados analisados.

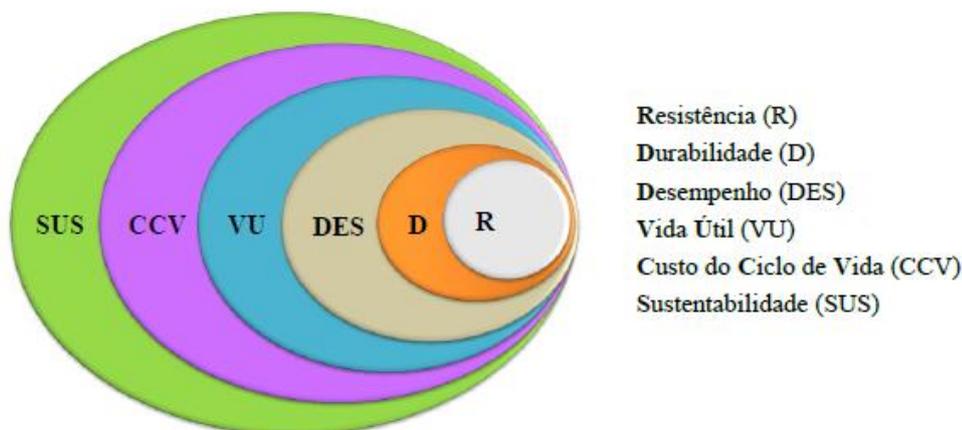
No capítulo 6 é apresentada a análise final que tem como finalidade alcançar o objetivo proposto no trabalho de relacionar a carbonatação das amostras de laboratório com os dados de carbonatação obtidos para as estruturas existentes. Por fim, no último capítulo (capítulo 7) são apresentadas as considerações finais da pesquisa e sugestões para futuros trabalhos.

2 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL

A durabilidade de um material depende de diversos fatores. No caso do concreto armado as principais características para determinar se este é durável ou não são: as propriedades dos materiais que o compõem; a interação destas propriedades com o meio ambiente no qual a estrutura está inserida; e o desempenho final observado pelo usuário. Garantir a durabilidade das estruturas de concreto armado é um dos principais compromissos da Engenharia com os usuários das construções e com o meio ambiente. Não se trata apenas de preservar a segurança estrutural, é também um comprometimento de que toda a energia e os recursos materiais empregados na construção sejam utilizados da melhor maneira possível durante o maior tempo viável.

O conceito de durabilidade vem evoluindo de forma simultânea com a construção civil e com as transformações nas necessidades dos usuários. O conceito mais antigo da Engenharia de se utilizar somente a resistência como parâmetro principal para garantir a integridade de uma estrutura está ultrapassado. Devido aos estudos que ampliaram o conhecimento sobre os materiais utilizados na Engenharia Civil e suas interações com o meio ambiente, incorporaram-se conceitos de durabilidade e desempenho para definir propriedades do concreto armado. Atualmente, com o auxílio da tecnologia é possível acrescentar também de maneira quantitativa a questão do tempo através do conceito de vida útil e análises probabilísticas. Outros fatores foram agregados a este grupo como: aspectos econômicos (associados aos custos do ciclo de vida), que englobam utilização e manutenção, e a procura por soluções mais sustentáveis para a construção civil (POSSAN, 2010). A Figura 2 ilustra este pensamento.

Figura 2 – Evolução conceitual do projeto das estruturas de concreto



(fonte: POSSAN, 2010)

Mehta e Monteiro (2014) dissertam sobre os aspectos econômicos ligados à questão da durabilidade. Segundo os autores, aproximadamente 40% do orçamento da construção civil em países desenvolvidos destina-se à manutenção e ao reparo de estruturas existentes. Projetando-se estruturas mais duráveis, menos suscetíveis ao aparecimento de falhas, grande parte do montante associado a restaurações de danos evitáveis poderia ser aplicado para solucionar preocupantes problemas de déficits habitacionais e questões de infraestrutura. A utilização de recursos financeiros e materiais para solucionar manifestações patológicas nas construções torna-se ainda mais inoportuna quando se trata de estruturas do patrimônio público, uma vez que, nestes casos, os prejuízos são arcados pela população.

O aumento na capacidade das estruturas de resistir não apenas às cargas aplicadas, mas também à ação das intempéries, representaria importantes ganhos na área da sustentabilidade. De acordo com Müller, Haist e Vogel (2014) a ideia chave para estabelecer uma engenharia sustentável passa por reduzir ao máximo o consumo de recursos e energia na construção e operação das estruturas de concreto armado. Os autores discutem três maneiras básicas de realizar esta missão: redução nos impactos da fabricação do concreto; aumento no desempenho; e a utilização de premissas de projeto que permitam ampliar a vida útil da construção.

Mesmo com fatores sustentáveis, econômicos e financeiros indicando a necessidade de planejar e projetar estruturas mais duráveis, ainda se percebe situações preocupantes que ocorrem devido à baixa qualidade das construções brasileiras. Neste contexto, com o objetivo de estabelecer critérios mínimos para proteger os usuários, surge, em 2013, a Norma de Desempenho das

Edificações (NBR 15575 -1 ABNT, 2013). Esta normativa complementa os critérios de durabilidade estabelecidos na NBR 6118 (ABNT, 2014).

As normas de dimensionamento e execução são baseadas na experiência de anos de utilização do material concreto armado. São consideradas prescritivas, visto que compilam requisitos e critérios do material ou de procedimentos específicos. Por outro lado, as normas de desempenho têm como finalidade atender a critérios do usuário de forma direta. O ideal é utilização simultânea destas, garantindo um atendimento tecnicamente adequado ao usuário (NBR 15575 -1 ABNT, 2013).

Silva Filho (1994) salienta que a durabilidade pode ser vista como “uma característica dinâmica de um sistema” uma vez que esta varia constantemente em função de diversos fatores relacionados com garantir o desempenho esperado pelo usuário.

A NBR 15575-1 (ABNT, 2013) refere-se à durabilidade como a “Capacidade da edificação ou seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificados no manual de uso, operação e manutenção.”. Associadamente, a NBR 6118 (ABNT, 2014) destaca a responsabilidade dos profissionais da construção civil quando menciona que as influências ambientais que afetarão a estruturas devem ser definidas, antes da elaboração do projeto, de forma conjunta pelo projetista estrutural e o contratante.

A durabilidade das estruturas de concreto armado deve ser um aspecto idealizado desde o projeto. Para assegurar que a construção irá resistir às ações das intempéries durante o período para o qual foi projetada é necessário escolher materiais e combinações adequados para o microclima, garantir a correta execução e, principalmente, respeitar as normas de dimensionamento e execução vigentes. O desempenho adequado de uma estrutura está profundamente relacionado com obedecer às exigências prescritas para o ambiente no qual está inserida.

Como mencionado anteriormente, as propriedades dos materiais que compõem uma estrutura devem ser adequadas ao microclima onde esta se encontra. Em outras palavras, estes materiais devem possuir características compatíveis com as condições ambientais do meio para garantir a conservação das circunstâncias de uso da estrutura ao longo do tempo. Os processos de manutenção surgem neste contexto para que leves interferências sejam feitas visando conservar as características das estruturas.

Ressaltando a influência das condições ambientais, Mather (2004) define que a durabilidade não pode ser vista apenas como uma propriedade do concreto ou de um conjunto de características. Segundo o autor, o material só poderá ser considerado durável se atingir o comportamento esperado para sua vida útil de serviço no ambiente em que este se encontra, sem despesas extras não programadas para recuperação da estrutura. Para ilustrar esta perspectiva, o autor cita como exemplo a utilização de concretos imunes ao efeito do gelo e degelo. Esta propriedade não aumenta a qualidade do concreto em ambientes sem registro de congelamentos.

Visto a grande influência do meio na durabilidade das estruturas de concreto armado, a NBR 6118 (ABNT, 2014) aponta a agressividade do meio ambiente como aspecto preponderante a ser definido para o correto dimensionamento das estruturas. Esta normativa classifica os ambientes em classes de agressividades e define quais os riscos de deterioração para as construções em cada uma destas classes, conforme pode ser observado no Quadro 1.

Quadro 1 – Risco de deterioração da estrutura

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

(fonte: NBR 6118 - ABNT, 2014,)

Silva Filho (1994) define a variabilidade do ambiente como o maior obstáculo para estimar de forma precisa a durabilidade de uma determinada estrutura. Segundo o autor, devido à imprevisibilidade das oscilações nas condições ambientais, usualmente, acaba sendo possível estimar o ambiente apenas de maneira aproximada, sem muita precisão.

Além da definição da classe de agressividade ambiental ainda na fase de projeto, Medeiros, Andrade e Helene (2011) apresentam três principais premissas para a questão da durabilidade. Primeiramente, compreender o comportamento do material concreto no decorrer de sua vida útil, utilizando estudos de mecanismos de transporte de líquidos e gases. Em segundo lugar, remediar o aparecimento de manifestações patológicas precoces que aceleram o processo de degradação da estrutura. E por fim, reduzir os impactos ambientais oriundos da construção civil para colaborar com uma engenharia mais sustentável.

Mehta e Monteiro (2014) mencionam que até mesmo um concreto bem executado pode sofrer com manifestações patológicas precoces. Para os autores, estes casos trazem consigo importantes ensinamentos sobre como aperfeiçoar os conhecimentos para controlar a influência dos fatores determinantes na redução da durabilidade das estruturas.

Outros conceitos importantes para a questão da durabilidade e desempenho são: a vida útil, e a vida útil de projeto. O tempo no qual uma estrutura é capaz de manter seu desempenho, considerando um processo de manutenção adequado planejado em projeto, é denominado vida útil (VU). Por outro lado, o período para o qual o sistema é projetado é denominado vida útil de projeto (VUP). Existem inúmeros fatores aleatórios, geralmente de difícil previsão ainda na fase de projeto, que alteram estes períodos, como por exemplo, alterações climáticas, variações nos níveis de poluição no local e mudanças no entorno da edificação, por isso estes são valores teóricos estimados (NBR 15575-1 - ABNT, 2013).

Medeiros, Andrade e Helene (2011) apresentam quatro fatores a serem observados e atendidos quando se trata de estimar a vida útil de uma estrutura:

- a) apresentar e justificar os critérios adotados para a escolha do valor;
- b) estabelecer uma probabilidade alta de que o valor escolhido seja o mais próximo possível do real;
- c) reforçar que inspeções periódicas devem ser realizadas periodicamente para identificar e solucionar distúrbios que

comprometam o valor adotado, ou que provoquem a necessidade de recálculos;

d) entender a necessidade de profissionais qualificados com equipamentos adequados para a determinação do fim da vida útil de uma estrutura.

Simular o comportamento de uma estrutura de concreto em um longo período de tempo não é uma tarefa simples. Para estimar ou quantificar a perda de desempenho das estruturas de concreto armado, primeiramente, é essencial compreender como atuam os fatores responsáveis pela perda da durabilidade nas estruturas. Estes são os agentes externos que se encontram no meio ambiente e os agentes internos do concreto. Desta maneira, pode-se afirmar que a durabilidade está altamente relacionada com outra condição, além da agressividade do meio: a permeabilidade do concreto. É esta característica que controla a facilidade ou dificuldade de entrada dos agentes agressivos no interior do material (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A definição de valores adequados para a vida útil das estruturas é um grande desafio para a Engenharia, dada a quantidade de fatores envolvidos. Trata-se de uma questão econômica, social e de sustentabilidade. Os avanços nos estudos nas áreas de transporte de líquidos e gases no interior do concreto permitiram a criação de modelos matemáticos com o objetivo de quantificar a vida útil do material (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011). Contudo, para que estas ferramentas gerem resultados efetivos é necessário que os dados de entrada retratem de forma adequada a agressividade do meio e as propriedades dos materiais que compõem a estrutura.

Outra limitação para a utilização de modelos para previsão de vida útil é apresentada por Müller, Haist e Vogel (2014). Segundo os autores, como os mecanismos de deterioração raramente atuam sozinhos, para uma modelagem realista da vida útil de uma estrutura é essencial considerar a combinação e interação de fatores de degradação, sendo mais adequado, portanto, a utilização de uma abordagem probabilística para solucionar o problema.

De acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2013) os projetistas, construtores e incorporadores têm a responsabilidade de estabelecer os valores teóricos de tempo de vida útil de projeto. Uma vez que esta já se encontra definida, toda a cadeia de produção (técnicas de execução, escolha de materiais, entre outros) deve ser pautada para este valor. Economias em excesso nas fases iniciais de planejamento e execução podem vir a representar altos custos de manutenção para garantir a durabilidade da edificação, que serão arcados pelos usuários. Com o objetivo de

proteger o consumidor, a NBR 15575-1 estabelece um valor mínimo de cinquenta anos para a vida útil de projeto de estruturas de concreto armado. Segundo a mesma norma, este prazo é inferior a alguns adotados internacionalmente por motivos socioeconômicos, principalmente em decorrência do déficit habitacional do país. Também é previsto que este valor poderá ser alterado em futuras revisões da norma.

Discutidas as questões relacionadas à durabilidade, nos próximos capítulos serão apresentados assuntos referentes aos agentes de degradação responsáveis por alterações na vida útil das estruturas de concreto armado, com foco na corrosão das armaduras. A ênfase do trabalho é a carbonatação do concreto, desta maneira, este fenômeno será explicado de maneira mais detalhada nas partes a seguir do trabalho.

3 CORROSÃO DE ARMADURAS E CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

Este capítulo trata da corrosão de armaduras, um dos fenômenos mais comuns de degradação de estruturas de concreto armado. A corrosão tem duas origens distintas, a primeira está associada à ação dos cloretos e a outra está relacionada com a carbonatação do concreto. Em seguida, por ser assunto principal da presente pesquisa, a carbonatação do concreto será discutida de maneira mais detalhada ainda neste capítulo.

3.1 CORROSÃO DE ARMADURAS

Difícilmente a deterioração de uma estrutura de concreto armado está associada a apenas um fator isolado, entretanto, destaca-se a corrosão das armaduras como uma das principais manifestações patológicas responsáveis pela degradação das construções. Além disto, a corrosão também é considerada a avaria que apresenta maiores custos com reparo por interferir na capacidade portante das obras de engenharia civil. Este fenômeno tem origens nos processos de carbonatação, que geralmente ocorrem em ambientes urbanos e industriais com alta concentração de gás carbônico, ou devido à exposição a íons cloreto em ambientes marinhos ou com sais de gelo e degelo (BAROGHEL-BUNNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

Para a compreensão do processo de corrosão das armaduras de aço é necessário primeiramente entender o funcionamento do mecanismo químico de proteção das barras de aço no interior do concreto. Na fase de hidratação do cimento é formado o hidróxido de cálcio que é determinante para o ambiente alcalino do material, em conjunto com álcalis que estão presentes no clínquer. Devido a estas substâncias, o pH nos poros do concreto varia entre valores da ordem de 12,6 a 14 (alcalino). Isto faz com que o aço da armadura esteja passivado, ou seja, protegido por uma película de óxidos compacta, invisível e contínua ao longo da barra (ANDRADE, 1992).

O processo de corrosão do aço em meio aquoso é um fenômeno eletroquímico. Existe uma reação de oxidação e outra de redução, ocasionando a circulação de íons através do eletrólito. Isto faz com que sejam formadas duas zonas distintas na superfície metálica, a que produz a oxidação e opera como ânodo, liberando íons que circulam através do metal até onde reagem para produzir a redução dos íons hidrogênio (em meios ácidos) e do oxigênio (dissolvido na

água em meio alcalino ou neutro) do eletrólito. A este processo atribui-se o nome pilha de corrosão. (ANDRADE, 1992)

A corrosão do aço ocorre em duas etapas. A primeira é o período de incubação, também conhecido como período dormente ou preliminar, durante o qual a alcalinidade do concreto é atingida, favorecendo a instalação do processo de deterioração. Esta fase pode ser iniciada pela carbonatação do concreto de cobrimento ou pelo ingresso de íons cloreto. A segunda fase é o período de propagação, onde já é possível observar a formação de produtos da corrosão, como a formação de óxidos e hidróxidos de volumes superiores ao do aço. Essas variações volumétricas geram pressões capazes de provocar fissuração, lascamento seguido de destacamento do concreto e uma redução da aderência da armadura (BAROGHEL-BUNNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

O período a ser observado para a questão da preservação das armaduras é o de incubação, pois este que controla o início do processo de corrosão. O cobrimento de concreto é essencial para evitar este fenômeno, portanto além de fixar-se uma espessura adequada, para garantir a durabilidade da estrutura é essencial que as características de transporte (permeabilidade, difusividade) assegurem que o concreto funcione como uma barreira física para evitar a entrada dos agentes de degradação (BAROGHEL-BUNNY; CAPRA; LAURENS., 2014).

A corrosão das armaduras está associada a perdas na seção e aumento da fragilidade das barras de aço, bem como à diminuição de aderência entre o aço e o concreto, que prejudicam o desempenho estrutural do elemento. Para este tipo de manifestação patológica é essencial que os reparos sejam realizados de maneira preventiva, aumentando a possibilidade de conservação da segurança estrutural da construção.

Quanto à origem deste problema, a NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta os principais mecanismos de envelhecimento e deterioração relacionados à armadura como sendo:

- a) despassivação por carbonatação: aquela ocorre devido à ação do gás carbônico do ambiente. Para evitar este fenômeno é necessário dificultar a entrada dos agentes agressivos nos elementos de concreto, para isto, é essencial garantir o correto cobrimento das armaduras, controlar a fissuração e assegurar a baixa porosidade do material;
- b) despassivação por ação de cloretos: ocorre quando um alto teor de íons-cloreto provoca uma perda local na camada de película passivadora. Neste caso, também deve-se barrar a entrada dos agentes agressivos com a garantia do cobrimento de concreto na espessura correta, controle de fissuração e baixa

porosidade. A utilização de cimentos com adições de pozolanas ou de escória também colabora para evitar este fenômeno.

A despassivação seria a destruição da película passivante ao redor das barras de aço, permitindo assim que se inicie o processo de corrosão. Embora a ação de cloretos seja de extrema importância para a questão da corrosão de armaduras, o foco do presente trabalho é a carbonatação do concreto que será discutida no próximo item.

3.2 CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

A carbonatação é a reação entre os álcalis presentes no concreto com gases ácidos presentes no ambiente, através de um processo físico-químico. Este processo é responsável por reduzir o pH do concreto, criando condições favoráveis para a despassivação da armadura. Os principais gases da atmosfera, em zonas urbanas, responsáveis por produzir esta reação são o dióxido de enxofre (SO₂), o gás sulfídrico (H₂S) e o gás carbônico (CO₂). Por se tratar do gás com maior incidência no meio ambiente, o CO₂ dá origem ao nome do processo (FIGUEIREDO, 2005; KULAKOWSKI, 2002).

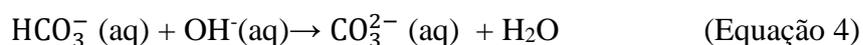
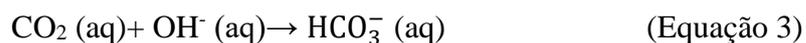
Trata-se de um processo lento, que começa na superfície do concreto e dirige-se ao seu interior. Tuutti (1982) atribui a baixa velocidade do fenômeno à impermeabilidade e a reserva de hidróxidos do material, e às baixas concentrações de gás carbônico na atmosfera. De acordo com o IPCC (2014) as emissões de gás carbônico na atmosfera devido à ação humana quadruplicaram nos últimos 50 anos, e apesar do aumento das políticas de mitigação a mudança climática, as emissões continuaram a aumentar no período de 2000 até 2010. Sabe-se que a crescente atividade industrial, o aumento no consumo de combustíveis, e a remoção de vegetação em zonas urbanas e rurais, tornam o ambiente gradualmente mais agressivo e, conseqüentemente, as estruturas de concreto, cada vez mais suscetíveis ao fenômeno da carbonatação.

A quantidade de gás carbônico presente na atmosfera varia conforme a agressividade do ambiente, de acordo com Neville e Brooks (2013), as concentrações oscilam de aproximadamente 0,03%, em volume, para ambientes rurais até valores superiores a 0,3% em grandes centros urbanos. O autor também atribui um valor em torno de 0,1% para laboratórios não ventilados. Estes valores estão em concordância com os propostos por Ekolu (2018),

segundo o autor, regiões urbanas apresentam taxas de CO₂ até dez vezes maiores que ambientes campestres. Helene (1993) cita faixas de valores para a concentração de CO₂, de 0,03% a 0,05% para zonas rurais e 0,1% a 1,2% em áreas com intenso tráfego de veículos. Já para atmosferas mais agressivas, como silos de determinados materiais, o autor sugere um valor de 1,8%, em volume.

Os principais mecanismos de transporte responsáveis pelo acesso de agentes agressivos para o interior do concreto são: a permeabilidade; a absorção capilar; a difusão de íons e gases e a migração de íons. Estes mecanismos podem agir de maneira isolada ou até mesmo de forma combinada. Outros aspectos que interferem no processo se referem a características do ambiente (incidência do sol, umidade relativa, vento, temperatura, entre outros) e questões ligadas ao projeto e execução, como por exemplo, relação água/cimento, presença de adições, entre outros (POSSAN, 2010).

Quando se trata de carbonatação, de acordo com Helene (1993), o principal mecanismo de penetração do CO₂ no concreto é a difusão do gás carbônico da atmosfera na água presente nos poros do concreto. Papadakis, Vayenas e Fardis (1989) separam o processo de carbonatação em etapas elementares, a primeira etapa é referente à dissolução do Ca(OH)₂ conforme a Equação (1). As outras etapas elementares do processo, segundo os autores, são: a liquefação do gás carbônico (Equação 2); a solubilização do CO₂ (Equações 3 e 4) e por último a formação do carbonato de cálcio (Equação 5)



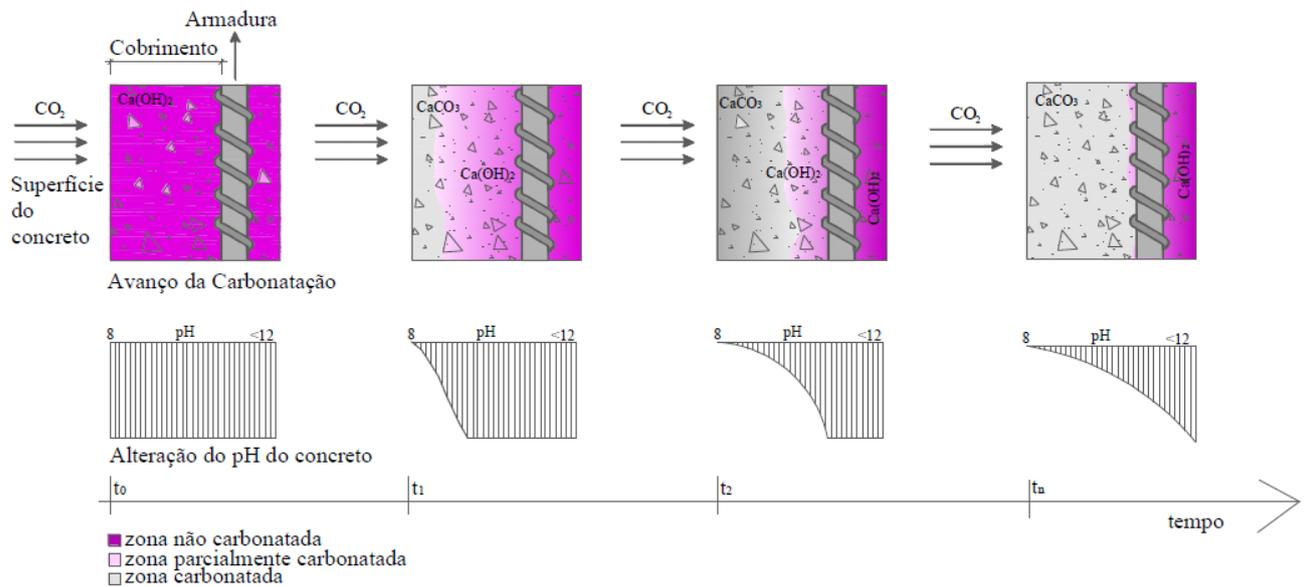
A entrada do gás carbônico modifica a microestrutura do revestimento de concreto, devido ao fato dos compostos hidratados do cimento reagirem com o CO_2 , alterando as condições iniciais do material. A alta alcalinidade do concreto é atribuída à presença do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) oriundo da hidratação do cimento (HELENE, 1993). Na carbonatação este composto reage com o CO_2 dando origem ao carbonato de cálcio (CaCO_3). Esta é a reação principal que descreve o fenômeno de carbonatação (Equação 6).



O consumo do hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 é responsável por reduzir a alcalinidade do concreto. De acordo com Papadakis, Vayenas e Fardis (1989) o fenômeno ocasiona o que os autores definem como frente de carbonatação, sendo esta a separação entre as áreas completamente carbonatadas e aquelas onde ainda não ocorreram as reações descritas anteriormente. Ainda segundo os autores, com o fenômeno de carbonatação ou penetração de íons cloreto, o valor altamente alcalino de pH do concreto que em condições normais encontra-se em torno de 13 chega a atingir valores abaixo de 9.

Figueiredo (2005) menciona os valores de pH igual a 8 para a zona carbonatada, mais próxima da superfície, e a parte não carbonatada valores superiores a 12. Possan (2010), por outro lado, divide três zonas com diferenças de pH, em ordem de proximidade da superfície: a primeira é a zona carbonatada, com pH aproximadamente 8,3; seguida pela zona parcialmente carbonatada (pH próximo de 10); e por último a zona não carbonatada com pH em torno de 12,5. Ta et al. (2016) denominam a zona parcialmente carbonatada como zona de transição ou frente de carbonatação. A Figura 3 ilustra as zonas anteriormente citadas.

Figura 3 – Representação do avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto



(fonte: POSSAN, 2010)

Dentre as consequências da carbonatação Neville e Brooks (2013) citam também: a retração, que acontece devido à contração do concreto; um leve aumento na resistência do material, devido ao depósito de CaCO_3 nos poros internos da pasta de cimento que reduz a permeabilidade do elemento. Papadakis, Vayenas e Fardis (1989) também citam a redução na porosidade e no tamanho médio dos poros provocada pelo fenômeno, entretanto, segundo os autores, esta diminuição ocorre devido ao fato de os produtos da carbonatação terem volumes molares maiores do que aqueles elementos consumidos na reação. Embora estes aspectos sejam positivos, não representam ganhos para a durabilidade das estruturas quando comparados com a redução da vida útil e manifestações patológicas decorrentes do fenômeno.

O cobrimento de concreto acaba por perder sua função de ser uma barreira química para a armadura, devido à queda no nível de pH do material. Pauletti (2009) ressalta que a redução na alcalinidade do concreto a princípio não é um fator que influencie no desempenho do material, segundo a autora, este processo só passa a ser prejudicial quando houver a presença de outras condições (água, oxigênio e diferença de potencial) que combinadas tornam o ambiente propício para o início da corrosão de armadura. De acordo com Neville e Brooks (2013), quando for possibilitada a entrada de umidade e oxigênio em um concreto com toda a profundidade de

cobrimento atingida pela carbonatação, haverá corrosão de armadura e, provavelmente, indícios de fissuras.

As orientações da NBR 6118 (ABNT, 2014) para minimizar os efeitos da carbonatação consistem em determinações para dificultar a entrada dos agentes agressivos para o interior do concreto. As medidas indicadas por esta normativa são: controlar a fissuração; adotar uma espessura de cobrimento adequada ao ambiente onde se encontra a estrutura; e utilizar concretos com baixa porosidade.

Existe um consenso na literatura quanto aos fatores determinantes para que ocorra a carbonatação diversos autores citam a permeabilidade e o teor de umidade do concreto, e a concentração de CO₂ e umidade relativa do meio ambiente como os aspectos principais para a carbonatação. Além destes, também são citados a questão da temperatura, as circunstâncias de exposição (se a estrutura se encontra em ambiente externo, interno, protegido ou desprotegido da chuva) e outras propriedades do concreto, como as características do aglomerante, traço utilizado e qualidade de execução (NEVILLE; BROOKS 2013; KAZMIERCZACK 1995; HELENE 1993; POSSAN 2010).

Tratando de execução, diversos autores (FIGUEIREDO, 2005; HELENE 1993; KULAKOWSKI, 2002) citam os cuidados com a cura como o principal parâmetro construtivo a ser observado para evitar a carbonatação. Além de todos os aspectos já apresentados, Tuutti (1982) também se refere às dimensões do elemento de concreto como significativos para o fenômeno, uma vez que estas influenciam o estado de umidade nos poros de concreto. De acordo com o autor, estruturas mais esbeltas são mais sensíveis às mudanças na temperatura ambiente do que estruturas mais robustas, havendo uma diferença significativa na taxa de secagem das peças e, conseqüentemente, resultando em valores de profundidade de carbonatação diferentes.

Para compreender o processo de carbonatação do concreto é essencial entender a contribuição de cada fator ambiental e das características do concreto para a evolução do fenômeno. Desta maneira, na próxima parte do trabalho serão detalhados os fatores que influenciam diretamente o avanço da frente de carbonatação, anteriormente citados.

3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

Este capítulo aborda os principais fatores que influenciam na origem e na velocidade do processo de carbonatação do concreto. Estes podem ser classificados em duas grandes categorias. A primeira categoria trata daqueles fatores relacionados às propriedades do material; e a segunda é referente aos aspectos associados ao ambiente de exposição. Estes fatores são apresentados na Tabela 1 e descritos a seguir.

Tabela 1 – Principais fatores que influenciam o processo de carbonatação do concreto

Fatores relacionados às propriedades do material	Relação água/cimento
	Permeabilidade
	Composição química do cimento
	Teor de clínquer
	Teor e tipo de adições
Fatores relacionados ao ambiente de exposição	Umidade relativa do ar
	Concentração de CO ₂
	Circunstâncias de exposição

Dentre as características do concreto que mais influenciam na reação de carbonatação destaca-se a **relação água/cimento**. Esta propriedade determina a permeabilidade do concreto que governa a difusão do gás carbônico no material. A utilização de relações água/cimento maiores implica no aumento da porosidade do concreto e, conseqüentemente, resulta em maiores profundidades de carbonatação. Entretanto, o volume de pasta de cimento pouco influencia para a reação, segundo Khunthingkeaw, Tangtermsirikul e Leelawat (2006) quando se trata de carbonatação, o aspecto mais importante relacionado à pasta é a qualidade e não a quantidade.

Associada de forma direta a relação água/cimento, a **permeabilidade** é outra característica de extrema importância para a compreensão do fenômeno de carbonatação. Mehta e Monteiro (2014) definem permeabilidade como “a facilidade com que um fluido sob pressão pode fluir através de um sólido.”. Conseqüentemente, segundo os autores, no concreto, a permeabilidade está diretamente relacionada ao tamanho, à quantidade e como se distribuem os poros na microestrutura.

Quanto mais poroso for o concreto, mais permeável é o material, e, portanto, mais suscetível à ação de agentes agressivos como o gás carbônico. A alta porosidade do concreto está associada a valores elevados para a relação água/cimento, e também, a falhas de execução. Possan (2010) afirma que a velocidade com que ocorre o fenômeno de carbonatação é diretamente proporcional a permeabilidade do concreto.

A permeabilidade do concreto não é governada apenas pela relação água/cimento, mas também pela quantidade de finos na mistura. Por exemplo, é possível obter um concreto bastante permeável com uma relação água/cimento baixa utilizando pouco material fino. Desta maneira, pode-se afirmar que para garantir a baixa permeabilidade do material é necessário, além de atentar para a relação água/cimento baixa, realizar uma dosagem adequada com uma quantidade apropriada de materiais finos que preencham os vazios da mistura (AHMAD, 2003).

Outra propriedade importante para a carbonatação está associada à **composição química do cimento**. O teor de clínquer, relacionado com a quantidade de álcalis presente no cimento disponíveis para a reação de carbonatação, vai depender do tipo de cimento adotado. Segundo Helene (1993) quanto maior a reserva alcalina do material, menores serão os valores de profundidade de carbonatação. Galan et al. (2010) ressaltam que é importante considerar que, ao acrescentar adições ao cimento, a relação água/clínquer aumenta, mas também deve-se atentar se o material adicionado contribui para elevar a quantidade de álcalis no cimento.

Na pesquisa realizada por Galan et al. (2010) os autores observaram diminuições nas profundidades de carbonatação e na quantidade de CO₂ absorvida em amostras com maiores teores de cimento. Segundo os autores, a diminuição da absorção de CO₂ com o aumento da quantidade de cimento indica que a redução na porosidade pode influenciar mais a velocidade de carbonatação do que o aumento de substâncias carbonatáveis. Além disto, de acordo com Ahmad (2003) a utilização de quantidades inadequadas de cimento provoca defeitos na superfície do concreto (como fissuras) que favorecem a entrada de agentes agressivos para o interior da peça.

Outro fator que provoca diferenças significativas na velocidade de carbonatação são os **teores e tipos de adição**. Ferreira (2013) mediu a profundidade de carbonatação em corpos de provas com cinco diferentes tipos de adições expostos à carbonatação natural por dez anos. Além de um concreto de referência sem adições, o autor também analisou as seguintes substituições

parciais para a massa de cimento: 10% de sílica ativa; 10% de cinza de casca de arroz; 10% de metacaulim; 25% de cinza volante e 65% de escória de alto forno. Como resultado, o autor observou que o concreto sem adições apresentou as menores profundidades de carbonatação e a escória de alto forno as maiores (resultado relacionado com a quantidade de álcalis). O autor constatou também o efeito de uma barreira física contra a carbonatação proporcionada por algumas adições que modificam o sistema de poros do concreto. Neste aspecto destacou-se a baixa profundidade de carbonatação (em relação às outras adições) nos corpos de prova com metacaulim e cinza de casca de arroz.

Em um estudo semelhante, proposto por Khunthingkeaw, Tangtermsirikul e Leelawat (2006), foram testados os comportamentos de amostras expostas a carbonatação natural e acelerada com duas cinzas volantes com mesmo módulo de finura, porém, com teores de CaO (óxido de cálcio) distintos. Assim como os outros autores anteriormente citados, Khunthingkeaw, Tangtermsirikul e Leelawat (2006) constataram que a carbonatação aumenta para teores mais altos de cinza volante. Para valores acima 50% a taxa de carbonatação foi de duas a três vezes maior do que a observada para o concreto referência sem adições. Estes resultados, obtidos para grandes quantidades de cinza, foram atribuídos ao fato de a redução na quantidade de cimento ser mais significativa para a carbonatação do que o efeito do preenchimento dos poros. Por fim, os autores destacam que a utilização de uma pequena quantidade de cinza volante (inferiores a 10%), com cura adequada, gera uma reação pozolânica que pode reduzir a porosidade do concreto e, inclusive, minimizar os efeitos da carbonatação.

A água é essencial para que ocorra o processo de carbonatação. O gás carbônico da atmosfera difunde-se nos poros do concreto, que são parcialmente preenchidos por água (para concretos não submersos). A taxa de difusão do CO₂ na fase líquida é 10⁴ vezes maior do que aquela que ocorre na fase gasosa, isto faz com que o teor de umidade do concreto (que é função da umidade relativa e do microclima onde se encontra a estrutura) influencie a velocidade de carbonatação (HELENE, 1993).

Segundo Tuutti (1982) a carbonatação do concreto ocorre em todos os poros do sistema desde que exista água disponível para a reação. Entretanto, segundo o autor, em concretos localizados em ambientes com **umidade relativa** abaixo de 80% ocorre a carbonatação incompleta. Chen e Ho (2013) salientam que as constantes mudanças na umidade relativa do ar na natureza estão altamente relacionadas com a temperatura ambiente.

A ausência de água nos poros impossibilita que ocorra a carbonatação, pois esta é necessária para que ocorra a reação. Por outro lado, em poros saturados, não ocorre a difusão do gás carbônico, fazendo com que o fenômeno também não aconteça. Segundo Helene (1993) ambientes com umidade relativa abaixo de 50% são secos demais para que ocorra a carbonatação e ambientes muito úmidos, com umidade relativa acima de 95% os poros já podem ser considerados saturados e praticamente não ocorre este processo de degradação. De acordo com o autor, as maiores taxas de carbonatação ocorrem para valores de umidade relativa entre 65% e 85%. Não obstante, Neville e Brooks (2013) apresentam a faixa de umidade relativa do meio ambiente para que ocorra a carbonatação como superior à 25% e inferior à 100%.

Além da umidade, outro fator significativo para a carbonatação é o **teor de gás carbônico** no ambiente. Como mencionado anteriormente, ambientes com maiores concentrações de CO₂ (zonas urbanas e/ou industriais) apresentam maiores profundidades de carbonatação. Entretanto, para ensaios acelerados, nem sempre a utilização de teores mais altos para a concentração gás carbônico na câmara resultam em maiores velocidades de carbonatação.

Pauletti (2004) realizou um estudo comparativo com argamassas expostas à carbonatação utilizando diferentes concentrações de CO₂ (de 6% e 100%). Os maiores resultados para a profundidade de carbonatação foram obtidos para aqueles corpos de prova ensaiados com o teor mais baixo (6%). Outro estudo proposto por Pauletti, Possan e Dal Molin (2007) verifica as condições adotadas por diferentes pesquisadores para ensaios acelerados. As autoras observaram, em diferentes trabalhos, que teores na ordem de 5% resultam nas maiores velocidades de carbonatação. Este fenômeno pode ser explicado devido ao fato da água ser um produto da carbonatação. Na presença de teores muito altos de CO₂, a água oriunda da reação vai saturando os poros do concreto dificultando a entrada do gás carbônico, diminuindo a velocidade do fenômeno.

Possan (2010) cita que a **temperatura** influencia no período de propagação da corrosão, mas variações na temperatura não provocam mudanças significativas na taxa de carbonatação. Figueiredo (2005) também afirma que para temperaturas usuais, não há efeito desta na velocidade da frente de carbonatação. Ainda segundo o mesmo autor, para os ensaios acelerados, também não há influência significativa da temperatura, pois esta não afeta a velocidade de difusão de CO₂, que é o mecanismo de transporte preponderante da reação.

Al-Khaiat, Haque e Fattuhi (2002) conduziram um estudo sobre carbonatação natural em clima árido no Kuwait. Os autores observaram profundidades de carbonatação menores para concretos executados e ensaiados no inverno do que aqueles testados no verão. Entretanto, é difícil estabelecer relações dos resultados obtidos com as temperaturas neste tipo de estudo, pois nas duas épocas do ano também ocorrem mudanças na umidade relativa e na precipitação, fatores considerados mais determinantes para o fenômeno de carbonatação do que a temperatura.

O último fator ambiental que modifica a carbonatação do concreto é referente às **circunstâncias de exposição**. As pesquisas sobre o assunto costumam analisar e comparar três situações distintas possíveis: o concreto em ambiente externo nas condições exposto à chuva e/ou protegido da chuva, e o concreto em ambiente interno.

O efeito da chuva na carbonatação é semelhante aquele provocado por umidades relativas muito altas. Neville e Brooks (2013) mencionam que estruturas expostas à chuva têm menores taxas de carbonatação, isto ocorre, pois quando os poros do concreto estão totalmente preenchidos por água a difusão do gás carbônico se torna muito lenta. Segundo Possan (2010) a velocidade de molhagem e secagem das estruturas, que altera a quantidade de água disponível para a difusão do CO₂, está relacionada com a chuva e também com a direção e velocidade do vento.

Galan et al. (2010) verificaram a carbonatação natural de corpos de prova elaborados com duas relações água/cimento e diferentes tipos de adições na cidade de Madri (Espanha). O estudo foi realizado em um período de um ano. Os autores utilizaram três condições de exposição: em ambiente externo desprotegido da chuva; em ambiente externo protegido da ação da chuva; e em ambiente interno em um prédio do Campus. Para as amostras com as mesmas características, aquelas que se encontravam em ambiente externo e abrigadas contra a chuva apresentaram as maiores profundidades de carbonatação, seguido daquelas de ambiente externo, porém desprotegidas, e por último, aquelas de ambiente interno, com os menores resultados. Os autores atribuíram estas diferenças as consequências dos ciclos de chuva. Como citado anteriormente, após a chuva os poros do concreto ficam saturados o que dificulta que ocorra a reação de carbonatação.

Em um estudo de carbonatação natural conduzido no litoral do México, Castro, Sanjuán e Genescá (2000) verificaram a influência de um **ambiente marinho** no fenômeno. Os autores variaram a distância do mar nos locais onde foram alocadas as amostras (50m, 100m e 780m

da costa). Como resultado os autores concluíram que a umidade e o teor de sal no ar aparentemente contribuíram para bloquear a entrada do gás carbônico nos poros do concreto, este resultado foi contrário ao esperado pelos autores e estes não encontraram explicações para esta contradição.

Concluído o estudo sobre os principais fatores que contribuem com o fenômeno de carbonatação, o próximo capítulo é uma introdução sobre modelos de previsão de carbonatação. Existem diversos modelos na literatura, porém nenhum deles está consolidado. No próximo capítulo são apresentados os modelos utilizados para a realização do presente trabalho.

3.4 MODELOS DE CARBONATAÇÃO

Com o objetivo de simular o comportamento da frente de carbonatação das amostras produzidas em laboratório em um tempo superior ao tempo de exposição do presente estudo foi utilizado um modelo de carbonatação. Este capítulo contém uma breve introdução sobre esta ferramenta, assim como um resumo do modelo que foi adotado na pesquisa.

Os modelos de carbonatação têm como finalidade estimar resultados para a profundidade de carbonatação a partir de informações obtidas em ensaios naturais ou acelerados do fenômeno. Geralmente, os estudos que dão origem aos modelos fazem uso de análises estatísticas para simular os resultados do processo físico-químico. Os dados de entrada para a utilização desta ferramenta usualmente são as características do ambiente de exposição e as propriedades do concreto, como aquelas apresentadas no capítulo anterior.

Antes de se definir o modelo que seria utilizado na presente pesquisa foi realizada uma análise exploratória de modelos disponíveis na literatura. Priorizou-se modelos cujos parâmetros de entrada fossem informações de fácil obtenção e que não exigissem testes de difícil e onerosas aplicações. O objetivo era adotar na pesquisa um modelo cuja aplicação seja possível tanto no meio acadêmico, quanto em ambiente profissional. Além desta característica, procurou-se por estudos recentes, cujos resultados foram obtidos a partir de materiais com tecnologia atual. Este critério foi adotado devido à grande evolução dos insumos da construção civil nas últimas décadas, principalmente o cimento, material com propriedades determinantes para o fenômeno de carbonatação.

Como citado anteriormente, o fenômeno de carbonatação é governado pela difusão. Desta maneira, os modelos encontrados na literatura utilizam a lei de Fick como base para estimar a profundidade de carbonatação de estruturas de concreto armado. De acordo com Pauletti (2009) no final da década de 1960 e início da década de 1970 alguns autores começam a conceber o primeiro modelo para estimar a carbonatação do concreto. Trata-se de uma equação simples (Equação 7) que relaciona a profundidade carbonatada como sendo proporcional à raiz quadrada do tempo.

$$y = k \cdot \sqrt{t} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

y = profundidade de carbonatação;

k = constante que depende das propriedades do material e do ambiente;

t = tempo.

Os modelos mais complexos incorporam mecanismos físico-químicos, aprimorados com estudos para fatores de calibração, que levam em consideração aspectos como cura, alterações nas propriedades do concreto e condições ambientais de difícil modelagem (BAROGHELBOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

Possan (2010) menciona duas fundamentações utilizadas no desenvolvimento de modelos de durabilidade, a empírica, baseada em análises estatísticas de resultados experimentais e outra denominada pela autora como fenomenológica ou complexa, que utiliza leis gerais que regem os fenômenos da natureza e deduções algébricas. Ekolu (2018) expande esta definição ao separar os modelos de carbonatação em quatro categorias:

- a) empíricos, elaborados a partir de resultados experimentais, usualmente são baseados na permeabilidade, na difusão, na resistência ou na composição do concreto;
- b) estatísticos, obtidos através da regressão de diferentes variáveis resultando em funções matemáticas (lineares, exponenciais, entre outras);
- c) numéricos, consistem em análises mais sofisticadas feitas através de *softwares* que utilizam como base as equações físico-químicas do fenômeno;
- d) de simulação, desenvolvidos a partir de algoritmos com parâmetros de entrada e saída, poucos estudos trabalham com esta linha de pesquisa.

Ta et al. (2016) mencionam também os modelos semi-empíricos, que fazem uso de dados de pesquisa e análises estatísticas ou numéricas. Estes, geralmente, são desenvolvidos para casos de aplicação específica, como por exemplo, a influência de determinada adição na profundidade de carbonatação, tendo aplicabilidade restringida. Os autores também citam a dificuldade de utilizar modelos numéricos devido ao fato destes exigirem dados completos e precisos, e a obtenção de excessivos parâmetros de entrada.

Após uma análise de diferentes modelos disponíveis na literatura que se enquadravam nos critérios previamente definidos, optou-se pela utilização do modelo para calcular a profundidade de carbonatação em ambiente urbano proposto por Possan (2010). Esta escolha deve-se principalmente ao fato desse modelo ser desenvolvido no Brasil, permitindo uma comparação direta com os materiais adotados na presente pesquisa. Este modelo também está adequado aos critérios de facilidade de obtenção dos dados de entrada.

O modelo matemático proposto por Possan (2010) foi desenvolvido com base no conhecimento de profissionais da área através de grupos focais para determinar quais os principais fatores que afetam a carbonatação e como estes se comportam. Foram realizados ajustes de dados considerando as leis físico-químicas que regem o fenômeno e testes com dados experimentais obtidos por outros pesquisadores.

A autora apresenta a seguinte equação para estimativa da profundidade de carbonatação:

$$y = k_c \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[\left(\frac{k_{ad} \cdot ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c} \right) + \left(\frac{k_{CO_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c} \right) - \left(\frac{k_{UR} \cdot (UR - 0,58)^2}{100 + f_c} \right) \right] \cdot k_{ce} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

y = profundidade de carbonatação do concreto [mm];

f_c = resistência característica à compressão axial do concreto [MPa];

k_c = fator variável referente ao tipo de cimento utilizado (Tabela 2);

k_{fc} = fator variável referente à resistência à compressão axial do concreto, em função do tipo de cimento empregado (Tabela 2);

t = idade do concreto [anos];

ad = teor de adição pozolânica no concreto, em % em relação à massa de cimento;

k_{ad} = fator variável referente às adições pozolânicas do concreto em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 2);

UR = umidade relativa média em %*0,01;

k_{UR} = fator variável referente à umidade relativa, em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 2);

CO_2 = teor de CO_2 na atmosfera em %;

k_{CO_2} = fator variável referente ao teor de CO_2 do ambiente, em função do tipo de cimento adotado (Tabela 2);

k_{ce} = fator variável referente à exposição à chuva, em função das condições de exposição da estrutura (Tabela 3).

Tabela 2 – Coeficientes do modelo em função das características do concreto e das condições ambientais

Tipo de Cimento	Características do concreto			Condições ambientais	
	Cimento	f_c	Adição	CO_2	UR
	k_c	k_{fc}	k_{ad}	k_{CO_2}	k_{UR}
CP I	19,80	1,70	0,24	18,00	1300
CPII E	22,48	1,50	0,32	15,50	1300
CP II F	21,68	1,50	0,24	18,00	1100
CP II Z	23,66	1,50	0,32	15,50	1300
CP III	30,50	1,70	0,32	15,50	1300
CP IV	33,27	1,70	0,32	15,50	1000
CP V ARI	19,80	1,70	0,24	18,00	1300

(fonte: POSSAN, 2010)

Tabela 3 – Coeficientes do modelo em função das condições de exposição

Proteção à chuva	kce
Ambiente interno protegido da chuva	1,30
Ambiente externo protegido da chuva	1,00
Ambiente externo desprotegido da chuva	0,65

(fonte: POSSAN, 2010)

Segundo a autora, na validação do modelo, com dados de profundidade de carbonatação de outros trabalhos, este se mostrou adequado sendo representativo em 75% dos resultados. Entretanto, Possan destaca que os maiores erros ocorreram nas amostras com adições pozolânicas, o que pode ser provocado pela variabilidade no material ou uma formulação inadequada para o coeficiente relacionado aos efeitos das adições.

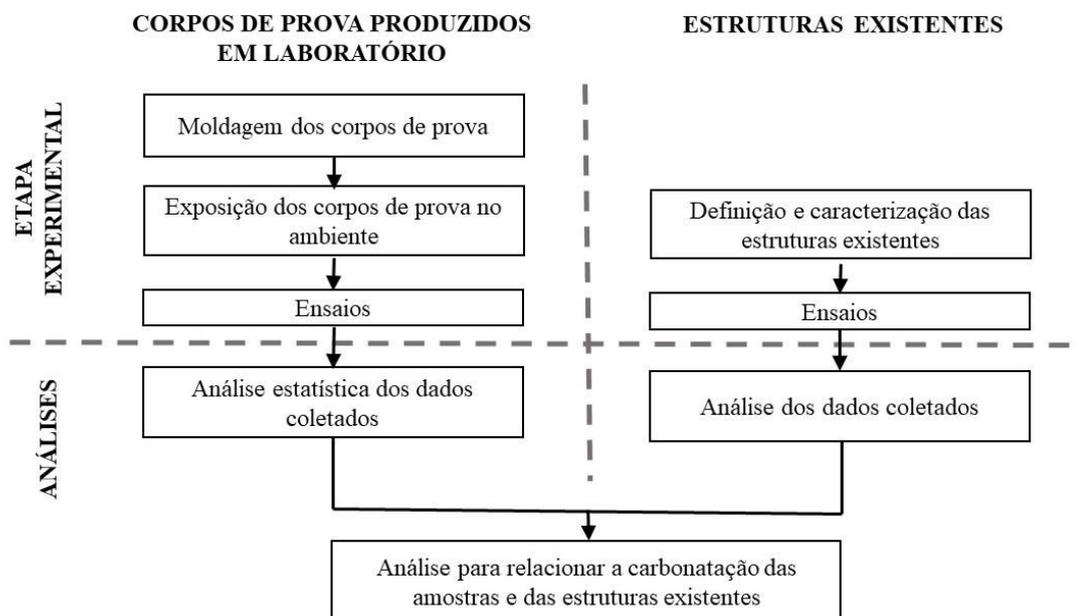
4 ETAPA EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve o programa experimental adotado na presente pesquisa para atingir os objetivos propostos no capítulo 1. São apresentadas as etapas experimentais da pesquisa, assim como os ensaios, critérios, materiais e métodos definidos para cada uma destas. Os resultados obtidos nos ensaios descritos a seguir estão apresentados no capítulo seguinte. Os ensaios foram realizados no LEME (Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais) e no LAMTAC (Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído).

Mehta e Monteiro (2014) atentam para os cuidados com estudos de processos físico-químicos de deterioração do concreto. A maior parte do conhecimento adquirido sobre os processos de degradação é oriunda de observações e análises de estruturas em campo, onde ocorre uma combinação de fatores e fenômenos a longo prazo, cuja simulação em laboratório é de difícil reprodução. Desta maneira os autores afirmam que é importante se ter cautela no estudo de apenas um fenômeno isoladamente, para evitar negligência com outros fatores que também agem simultaneamente na deterioração do material.

Para atingir os objetivos propostos no trabalho, foram definidas duas grandes etapas para a pesquisa, uma parte experimental e a outra de análises. A parte experimental é composta por duas etapas distintas. Uma destas etapas é aquela relacionada à determinação da profundidade de carbonatação de estruturas existentes, e a outra consiste na elaboração dos corpos de prova em laboratório para exposição em dois microclimas distintos. As etapas que compõem a parte experimental do trabalho, apresentadas na Figura 4, e os ensaios realizados estão detalhados nos itens a seguir.

Figura 4 – Etapas da pesquisa



4.1 CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS EM LABORATÓRIO

O programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de analisar o comportamento de diferentes tipos de cimento, relações água/cimento e ambientes de exposição para a carbonatação. Definiu-se um traço fixo utilizado para todos os corpos de prova (1:3:4) e estabeleceu-se três relações água/cimento (0,55, 0,60 e 0,65) e dois tipos de cimento (CPIV e CPV-ARI), resultando em seis combinações possíveis. Um resumo com os fatores controláveis assim como seus respectivos níveis está apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Fatores controláveis da pesquisa

Fatores controláveis	Níveis
Relação água/cimento	0,55
	0,60
	0,65
Tipo de cimento	CPV-ARI
	CPIV

Devido ao curto período de tempo, optou-se por **relações água/cimento** mais altas (0,55, 0,60 e 0,65) e um traço com pouco material cimentício para obter resultados de carbonatação natural dentro do intervalo de tempo programado para a pesquisa. Outro fator determinante para esta escolha é o comparativo que será realizado com estruturas mais antigas, que comumente apresentavam relações água/cimento maiores e traços com menores quantidades de cimento.

Quanto ao **tipo de cimento**, foram escolhidas apenas duas categorias para a análise, os dois tipos de cimento mais utilizados na região das estruturas analisadas. A primeira categoria trata-se do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), este é um cimento com menos adições e maior teor de clínquer. O segundo tipo adotado na pesquisa foi o cimento Portland CPIV, com adição de até 50% de material pozolânico.

São seis combinações possíveis alternando os níveis dos dois fatores controláveis da pesquisa. Para cada combinação foram executados oito corpos de prova prismáticos para os ensaios de carbonatação e três corpos de prova cilíndricos para o ensaio de compressão. Estas oito amostras prismáticas e três cilíndricas com as mesmas características foram confeccionadas em uma única betonada. No total foram realizadas seis betonadas (uma para cada combinação), resultando em um total de 48 corpos de prova prismáticos e 18 cilíndricos.

4.1.1 Descrição dos materiais

4.1.1.1 Cimento

Foram utilizados dois tipos de cimento para a elaboração dos corpos de prova. O primeiro tipo de cimento trata-se do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). A NBR 16697 (ABNT, 2018) estabelece que este deve conter de 90% até 100% da composição de clínquer e sulfato de cálcio e de 0% a 10% de material carbonático.

O outro tipo de cimento utilizado na pesquisa é o cimento Portland pozolânico (CPIV). De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018) este cimento deve apresentar a seguinte composição: de 45% a 85% de clínquer e sulfato de cálcio; de 15% a 50% de material pozolânico e de 0% a 10% de material carbonático.

O material pozolânico utilizado no cimento da presente pesquisa é a cinza volante. Abreu (2004) associa a utilização de cinza volante no cimento com um aumento na trabalhabilidade,

redução na exsudação e do calor de hidratação do material no estado fresco. Ainda segundo a autora, no estado endurecido a cinza volante pode ser responsável por modificar características como resistência à compressão, porosidade total, rede de poros e propriedades associadas à durabilidade. A alteração destes atributos vai depender das características químicas, físicas e mineralógicas da cinza. Cinzas volantes de mesma procedência podem possuir características diferentes em função de variáveis do processo de queima do carvão (ABREU, 2004).

Devido à grande influência que a composição química do cimento tem no fenômeno de carbonatação, foi realizada uma espectrometria de fluorescência de raios X para identificar os elementos químicos presentes no material e suas respectivas proporções. O resultado desta análise está apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição química dos cimentos adotados na pesquisa

Tipo de Cimento	Composição química				
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	RuO ₂
CPV	54,33%	34,64%	8,57%	2,39%	0,08%
CPIV	76,31%	20,35%	3,21%	0,09%	0,03%

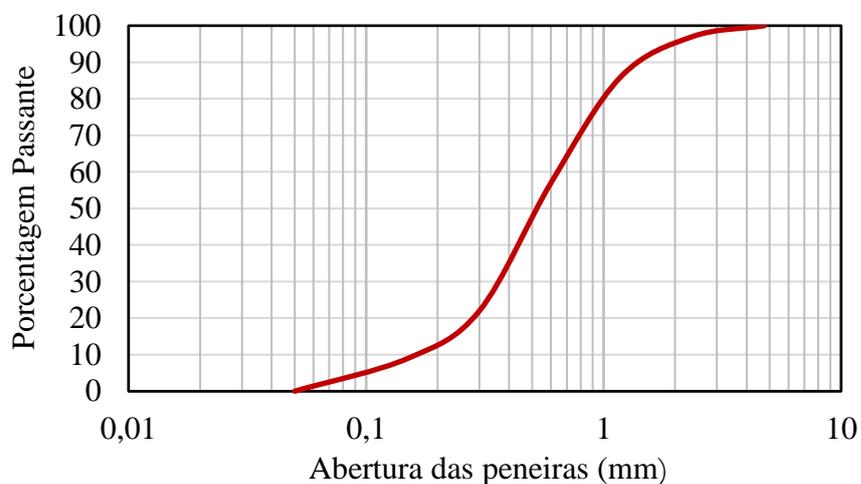
4.1.1.2 Agregado Miúdo

Para a elaboração dos corpos de prova foi utilizada areia média do Rio Jacuí como agregado miúdo. Os ensaios para determinar as características físicas e granulométricas do material foram realizados de acordo com as recomendações da NBR NM 248 (ABNT, 2003). Os resultados obtidos no ensaio estão apresentados na Tabela 6 e a curva granulométrica do material é representada na Figura 5.

Tabela 6 – Características granulométricas do agregado miúdo

Agregado Miúdo			
Peneira	Retido (g)	% Retida	% Retida acumulada
4,75	0	0%	0%
2,36	9,5	3%	3%
1,18	33,9	11%	14%
0,6	84,5	28%	43%
0,3	106,7	36%	78%
0,15	36,6	12%	91%
<0,15	28,2	9%	100%
Diâmetro máximo (mm)			2,36
Módulo de finura (-)			3,29

Figura 5 – Curva granulométrica do agregado miúdo



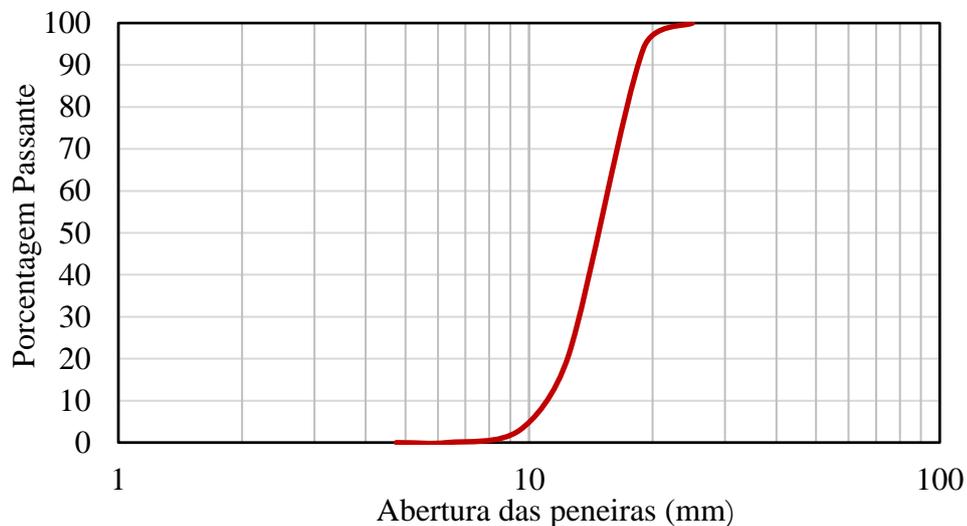
4.1.1.3 Agregado Graúdo

Para a elaboração das amostras foi utilizada, como agregado graúdo, uma rocha basáltica britada. As características granulométricas do material foram determinadas de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Os resultados estão apresentados na Tabela 7 e a curva granulométrica é representada na Figura 6.

Tabela 7 – Características granulométricas do agregado graúdo

Agregado graúdo			
Peneira (mm)	Retido (g)	% Retida	% Retida acumulada
25	0	0	0
19	90,1	6	6
12,5	1022,2	73	79
9,5	252,4	18	97
6,3	29,9	2	100
4,75	4	0	100
<4,75	2,9	0	100
Diâmetro máximo (mm)			25
Módulo de finura (-)			7,03

Figura 6 – Curva granulométrica do agregado graúdo



4.1.1.4 Aditivo

Apesar do uso de aditivos plastificantes e superplastificantes não estar associado com alterações no fenômeno da carbonatação, procurou-se evitar a utilização destes na elaboração das amostras. Entretanto, para a relação água/cimento mais baixa (0,55) nos dois tipos de cimento, devido à elevada quantidade de agregado, foi necessário utilizar um aditivo superplastificante

para atingir a consistência ideal que garantisse o correto preenchimento das formas. A quantidade adotada, assim como as propriedades deste material, fornecidas pelo fabricante, estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades do aditivo superplastificante

Propriedade	Resultado
Composição básica	Solução de policarboxilato em meio aquoso
Densidade média	1,08±0,02 kg/litro
pH	5,0±1,0
Dosagem adotada	0,3% sobre o peso de cimento

4.1.2 Execução dos Corpos de Prova

O concreto dos corpos de prova foi preparado em laboratório com o auxílio de uma betoneira de eixo vertical. A introdução dos materiais na betoneira respeitou sempre a mesma ordem: agregado graúdo (100%), parte da água (aproximadamente 50%), cimento (100%); parte da água (aproximadamente 25%); agregado miúdo (100%) e o restante da água (aproximadamente 25%).

Foram atendidas as recomendações da RILEM CPC-18 (1988) para as dimensões dos corpos de prova. De acordo com esta regulamentação, para estudos de carbonatação as amostras devem ter seção 100 mm x 100 mm e a divisão de comprimento deve ser feita em 50 mm para cada data de teste. Adotou-se corpos de prova com dimensões de 100 mm de altura, 100 mm de largura e 400 mm de comprimento para a realização de sete medições de profundidade de carbonatação.

Após a mistura do concreto, as formas de madeira foram preenchidas e foi realizada a vibração com auxílio da mesa vibratória por aproximadamente trinta segundos. Após as moldagens dos prismas realizou-se a moldagem dos corpos de provas cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, também utilizando a mesa vibratória, preenchidos em três camadas.

Foram realizadas seis betonadas, uma para cada combinação, totalizando em oito corpos de prova prismáticos e três cilíndricos em cada betonada. Após a moldagem, os corpos de prova

ficaram no laboratório cobertos por sacos plásticos até serem desmoldados no dia seguinte a concretagem. Após a desmoldagem estes foram alocados em câmara úmida (com temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa superior à 95%) pelo período de vinte e oito dias. Observou-se uma quantidade significativa de água na superfície do concreto antes da desforma (Figura 7), possivelmente um indício de exsudação devido à utilização de valores muito altos para a relação água/cimento, ou excesso de vibração.

Figura 7 – Água na superfície dos corpos de prova



Segundo Possan (2004) a etapa de sazonalidade não é necessária em estudos de carbonatação natural. Esta etapa tem como objetivo obter uma umidade uniforme nas amostras a serem testadas. Segundo a autora, como em um ambiente natural a umidade relativa, a precipitação, o teor de CO_2 e a temperaturas não são variáveis controladas não existe a necessidade de garantir esta uniformidade nas amostras.

Os corpos de prova cilíndricos foram retirados da câmara úmida aos 28 dias para o ensaio de resistência à compressão. Os corpos de prova prismáticos foram retirados da câmara aos 28 dias e alocados no laboratório até os últimos a serem executados completarem os 28 dias e serem todos levados ao ambiente de exposição na mesma data. Para cada combinação, quatro amostras foram alocados no Campus Centro no telhado do prédio da Escola de Engenharia (Figura 8) e quatro no Campus do Vale posicionado ao lado do Centro de Biotecnologia (Figura 9). Dois destes corpos de prova que foram dispostos no ambiente ficaram desprotegidos da chuva e dois abrigados sem contato com a chuva. Todas as amostras ficaram no mínimo 2 cm afastadas em todas as faces.

Figura 8 – Corpos de prova de concreto dispostos no prédio da Escola de Engenharia descobertos (a) e abrigados da chuva (b)

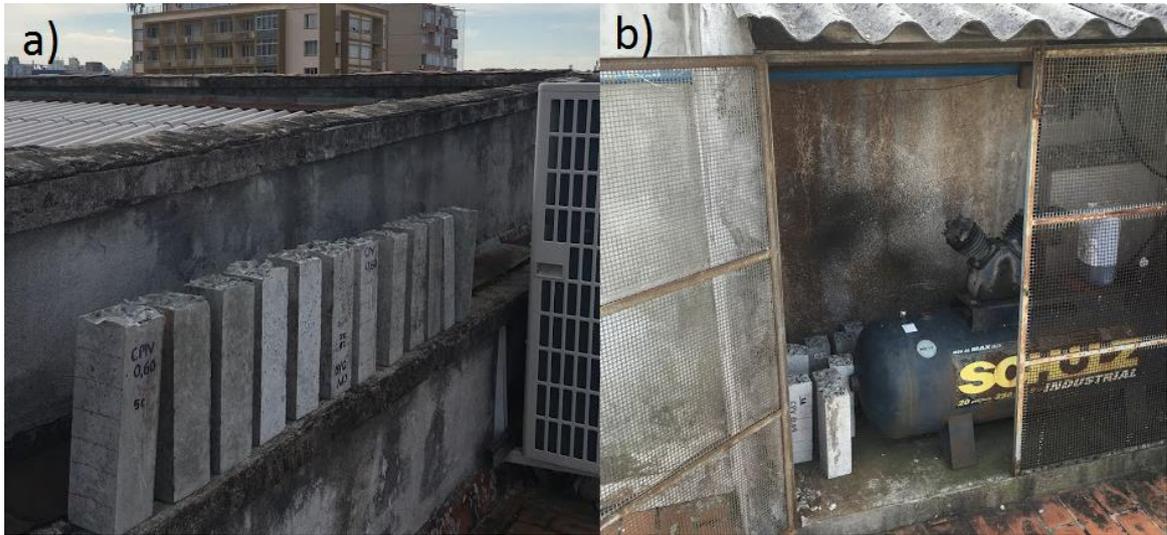


Figura 9 - Corpos de prova de concreto dispostos no prédio do Centro de Biotecnologia no Campus do Vale descobertos (a) e abrigados da chuva (b)



4.1.3 Condições ambientais

Como apresentado no capítulo 4, as condições ambientais que mais afetam o fenômeno de carbonatação são: a umidade relativa do ar, a concentração de CO_2 no ambiente e a condição de exposição (se o concreto está abrigado ou exposto à chuva). Estas variáveis se fizeram necessárias para traçar o comportamento das amostras expostas à carbonatação natural. Os dados referentes a umidade relativa do ar e à precipitação para o período de exposição das amostras (328 dias) foram coletados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019). O valor para a concentração de CO_2 foi medido no Campus do Vale com auxílio de equipamento

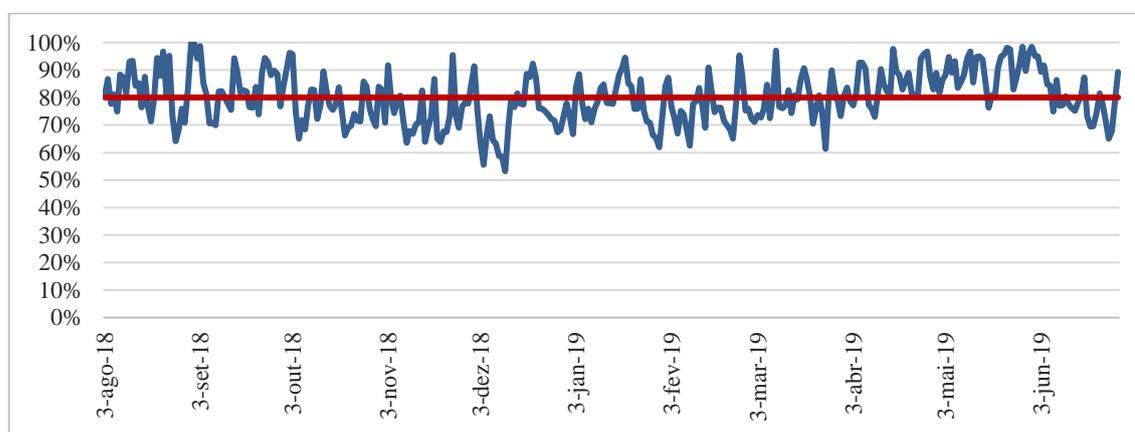
adequado, no Campus Centro, foi adotado o valor medido por Pauletti (2009). Estes valores utilizados na pesquisa estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Concentração de CO₂ nos locais de interesse da pesquisa.

Campus do Vale	Campus Centro
0,050%	0,071%

A Figura 10 apresenta os valores de umidade relativa do ar medidos para o período de exposição das amostras. Pode-se observar que a umidade relativa do ar média para o período foi de 80%, um valor considerado alto para carbonatação, lembrando que umidades na ordem de 60% favorecem o fenômeno e umidades superiores a 80% saturam os poros do concreto e dificultam a entrada do gás carbônico e, conseqüentemente, retardam as reações químicas. Entretanto, houve bastante variação de umidade no período e a análise levando em consideração apenas o valor médio pode não ser adequada. É possível verificar pelo gráfico que em várias datas a umidade se aproximou de 60%, assim como percebem-se períodos com a umidade muito alta próximas ou iguais a 100%.

Figura 10 – Umidade relativa do ar para o período de exposição das amostras



4.2 ESTRUTURAS EXISTENTES

Para atingir o objetivo de obter dados de profundidade de carbonatação de estruturas existentes foi utilizado o ensaio de medição de profundidade de carbonatação com um indicador de pH a base de fenolftaleína. As medições foram realizadas em pilares de fácil acesso da edificação.

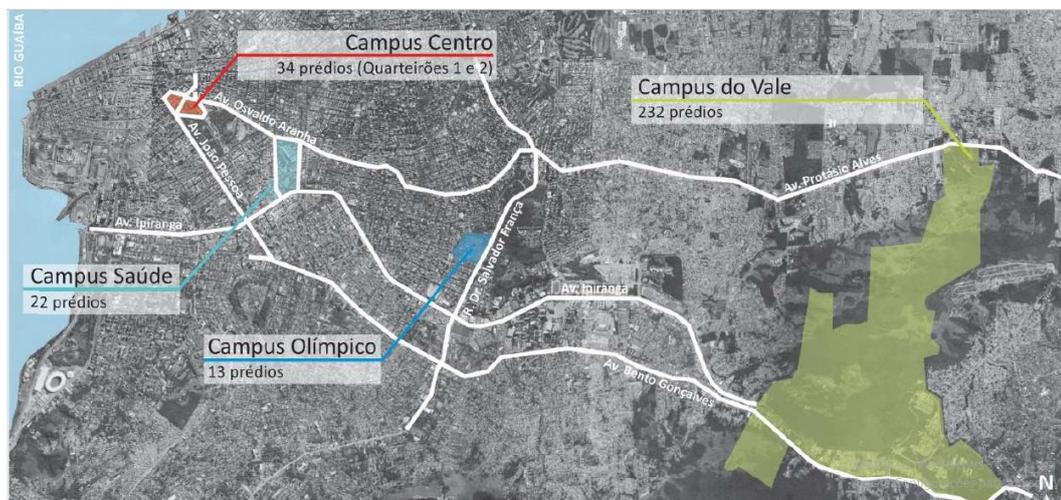
Investigou-se duas edificações na cidade de Porto Alegre, onde foram alocados os corpos de prova executados em laboratório. Foram selecionadas edificações da própria UFRGS devido à facilidade de acesso e de realização dos ensaios. A primeira edificação trata-se do Centro de Biotecnologia da UFRGS no Campus do Vale, situado em uma região com baixo tráfego de veículos e circundado de uma área com densa vegetação (Figura 11a). A outra edificação trata-se do prédio da Escola de Engenharia Nova, localizado no Campus Centro da UFRGS, um ambiente urbano central com intenso tráfego de veículos (Figura 11b). A Figura 12 apresenta a distribuição dos Campus da UFRGS dentro da cidade de Porto Alegre.

Figura 11 – Campus do Vale (a) e Campus Centro (b)



(fonte: a) DUTRA, 2012 b) SIMON, 2011)

Figura 12 – Mapa da localização dos Campi da UFRGS na cidade de Porto Alegre



(fonte: MANO, 2016)

O Campus do Vale está localizado na Avenida Bento Gonçalves nº 9500, no bairro Agronomia na cidade de Porto Alegre na divisa com o município de Viamão. O Centro de Biotecnologia

está localizado no Bloco IV do Campus do Vale (Figura 13), este foi o último bloco a ser construído, na zona mais alta do Campus.

Figura 13 – Localização do Centro de Biotecnologia no Bloco IV do Campus do Vale (a) e prédio do Centro de Biotecnologia (b)



(fonte: a) Google Maps, 2019 b) própria da autora)

Não foram encontradas informações documentadas sobre a construção do prédio do Centro de Biotecnologia e do Setor IV. Desta maneira, a idade do prédio foi estimada com base em pesquisas sobre o Campus do Vale. Espíndula (1979) apresenta uma imagem aérea de 1979 do Campus (Figura 14), onde é possível observar que o terreno destinado à construção do Bloco IV já estava em fase de preparação. Tonioli (2014) cita a gestão dos reitores Gerhard Jacob e Tiskon Dick de 1988 até 1992, como as responsáveis por finalizar as edificações do setor IV, entretanto segundo a autora, a estrutura já estava concluída, e a referida gestão foi responsável apenas por finalizar o acabamento dos edifícios. Com base nestas informações estimou-se, apenas para fins de cálculo deste trabalho, que o prédio do Centro de Biotecnologia foi construído entre 1982 e 1988.

Figura 14 – Terraplenagem do Setor IV



(fonte: ESPÍNDULA, 1979)

A outra edificação analisada no presente trabalho é o prédio da Escola de Engenharia Nova localizado na Rua Osvaldo Aranha no centro da cidade de Porto Alegre (Figura 15). Sua construção iniciou-se no ano de 1955 e foi concluída em 1960. A estrutura do prédio é composta por elementos de concreto armado.

Figura 15 – Prédio da Escola de Engenharia



4.3 PROGRAMAS DE ENSAIOS

As variáveis de resposta de interesse da pesquisa e suas respectivas unidades estão apresentadas na Tabela 10 e detalhadas a seguir.

Tabela 10 – Variáveis de resposta de interesse da pesquisa

Variáveis de resposta	Unidades
Resistência à compressão	MPa
Velocidade de propagação do pulso ultrassônico (VPU)	m/s
Características relativas à porosidade	-
Profundidade de carbonatação	mm

A **resistência à compressão** serve como parâmetro para a qualidade do concreto. Resistências menores indicam maior porosidade, e consequentemente, uma menor durabilidade. O ensaio de resistência à compressão consiste no monitoramento de aplicação controlada de uma carga vertical em um corpo de prova cilíndrico de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

Para a realização do ensaio, foram respeitadas as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018) e para a moldagem e preparação das bases dos corpos de prova e foram utilizadas as instruções da NBR 5738 (ABNT, 2015). As resistências foram medidas aos vinte e oito dias para todos os corpos de prova.

Com o intuito de obter mais informações sobre a porosidade das amostras, além do ensaio de resistência a compressão, foi realizado um ensaio de **velocidade de propagação do pulso ultrassônico (VPU)** em três corpos de prova prismáticos de concreto para cada combinação, conforme as orientações da NBR 8802 (ABNT, 2013) e um ensaio para determinar **caraterísticas relativas à porosidade do material**: absorção de água; índice de vazios e massa específica das amostras. Para isto, utilizou-se os fragmentos resultantes do ensaio de carbonatação natural. O ensaio seguiu as recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2005).

O ensaio de velocidade de pulso ultrassônico tem como objetivo medir o tempo que o pulso leva para percorrer uma distância entre dois transdutores de um aparelho de ultrassom. No caso do presente estudo, o tempo para o pulso atravessar uma seção de concreto. A velocidade de propagação do pulso é obtida através da divisão da distância entre os transdutores (no caso das

amostras 40 cm) pelo tempo obtido no ensaio. A velocidade do pulso, que varia conforme a quantidade de poros e vazios, aumenta para materiais com maior densidade (CAVALCANTI, 2010).

Quanto ao ensaio para determinar características relativas à porosidade do material são obtidas informações referentes à absorção de água (associada a condução da água dentro dos poros permeáveis do material), ao índice de vazios (determina a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total do sólido) e, por último, a massa específica real, (uma medida que relaciona a massa de material seco e seu volume, sem levar em consideração os poros permeáveis) (ABNT, 2005).

A principal variável de resposta da pesquisa é a **profundidade de carbonatação**. Conforme apresentado nos capítulos anteriores, o comportamento esperado era de valores de carbonatação maiores para amostras com relações água/cimento mais altas e com cimento pozolânico. A carbonatação também aumenta ao decorrer do tempo de exposição ao gás carbônico. A profundidade de carbonatação foi medida em sete idades diferentes de exposição.

Existem diversos questionamentos relativos aos testes de carbonatação natural e acelerada utilizando amostras produzidas em laboratório. Sanjuán, Andrade e Cheyrezy (2003) destacam, além das dificuldades oriundas da ausência de uma padronização consolidada destes ensaios, o perigo das incertezas envolvidas na extrapolação dos resultados dos testes para as condições da vida real. Desta maneira, os autores afirmam que é importante fazer uso desta ferramenta com cautela, podendo ser aplicada como uma fonte de informação para o estudo de modelos de previsão e para comparativos entre diferentes tipos de concreto.

Os **ensaios para determinação da profundidade de carbonatação** (de estruturas existentes e de corpos de prova moldados em laboratório) foram realizados conforme as instruções do procedimento CPC 18 da RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et Matériaux). Estes ensaios são realizados utilizando uma solução indicadora de pH de 1% de fenolftaleína e 70% álcool etílico. Esta solução permite identificar as áreas onde o pH é inferior a nove, áreas estas que ficam marcadas com a coloração incolor, enquanto as áreas de pH superior a nove recebem a coloração púrpura.

Nas estruturas existentes o ensaio foi realizado com o lascamento da estrutura e posterior medição com o indicador de pH. É fraturada uma pequena área na superfície do elemento

ensaiado e aspergida a solução, caso não mude a coloração da superfície ensaiada prossegue-se fraturando ainda mais a superfície. Este processo é encerrado quando aparece a coloração púrpura após a aplicação da solução e então é realizada a medição da profundidade carbonatada com o auxílio de um paquímetro. A Figura 16 ilustra este processo.

Figura 16 – Ensaio de medição de profundidade de carbonatação em uma estrutura



Para a realização do ensaio nas amostras de laboratório o corpo de prova é fraturado com o auxílio da prensa, na parte fraturada é aspergida a solução indicadora de pH (Figura 17). São verificadas as profundidades de carbonatação, com o auxílio de um paquímetro, nas quatro laterais da fração extraída da amostra. Para as datas iniciais (0, 28 e 61 dias) foi realizada uma medida por face, totalizando quatro valores medidos, nos demais testes, para as datas seguintes (91, 181, 270 e 330 dias) foram realizadas duas medidas por face, totalizando oito medições.

Figura 17 – Ensaio de medição de profundidade de carbonatação em uma amostra com indicador de pH



Devido aos intervalos entre as concretagens, para que todas as amostras obtivessem o mesmo tempo de cura e o mesmo tempo de exposição no meio ambiente, quando estas completavam os 28 dias na câmara úmida elas eram retiradas da câmara e alocadas no laboratório. Desta maneira a primeira verificação da profundidade de carbonatação ($t=0$) foi realizada antes dos corpos de prova serem alocados nos ambientes de exposição. As verificações seguintes para a profundidade de carbonatação após 28, 61, 95, 182, 270 e 328 dias de exposição no ambiente.

Após a coleta de dados através de ensaios experimentais foram realizadas **análises estatísticas** para cada conjunto de resultados. A análise estatística é uma importante ferramenta para compreender os fenômenos que ocorrem em um experimento. As respostas de um experimento, seja ele controlado ou não, sofrem grandes influências da variabilidade inerente aos ambientes de pesquisa. Ao alterar fatores controláveis de um experimento é necessário determinar se as mudanças obtidas nos resultados são oriundas da alteração propriamente dita ou de ruídos experimentais. Esta avaliação pode ser feita através da análise de variância (ANOVA). Maiores detalhes sobre a análise de variância podem ser encontrados em Montgomery e Runger (2012).

A partir dos resultados da análise de variância, é realizada então uma comparação entre médias para verificar o comportamento de cada fator que demonstrou ter uma influência significativa nos resultados experimentais. Esta comparação tem como objetivo identificar quais níveis do fator (individual ou dentro do grupo) provoca tal influência. Para tanto, compara-se a diferença das médias de cada tratamento (fator principal ou grupos de interações) com um limite de decisão de nível de significância de 0,05.

Caso o resultado da diferença das médias for superior ao limite de decisão calculado, significa que os níveis comparados têm 95% de probabilidade de serem diferentes e ambos exercerem influência nos resultados do experimento.

Discutida a parte experimental do trabalho, a próxima etapa refere-se à apresentação dos resultados obtidos nos ensaios programados e outros experimentos que se demonstraram necessários durante a realização do trabalho. Além da apresentação dos dados obtidos também é realizada uma discussão sobre os valores observados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos para as variáveis de interesse da pesquisa e ensaios complementares. Os ensaios foram executados conforme as descrições apresentadas anteriormente. A apresentação dos dados deste capítulo é feita sob a forma de tabelas e/ou gráficos, para cada ensaio, e seguido dos resultados obtidos na análise de significância estatística.

5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados para resistência à compressão aos 28 dias

Tipo de cimento	a/c	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão
CPV	0,65	28,15	28,15	2,66
		30,44		
		24,42		
		29,60		
	0,60	25,49	25,76	0,42
		25,54		
		26,24		
	0,55	31,73	34,12	2,15
		35,91		
34,72				
CPIV	0,65	24,13	22,21	3,27
		24,06		
		18,44		
	0,60	20,98	21,03	0,78
		20,27		
		21,83		
	0,55	30,45	28,34	2,12
		28,36		
		26,22		

O comportamento usual esperado para a resistência do concreto, segundo a Lei de Abrams, é a obtenção de valores maiores de resistência para relações água/cimento mais baixas. Entretanto, os resultados apresentados na Tabela 8 não estão de acordo com este princípio, pois os concretos com a relação água/cimento 0,65 alcançaram valores de resistência superiores aqueles com relação água/cimento 0,60 para os dois tipos de cimento.

Devido a esta incoerência, foi realizada uma investigação estatística dos resultados obtidos para as resistências à compressão através de uma análise de variância. Esta investigação teve como objetivo determinar se as mudanças obtidas nos resultados são oriundas da alteração nos valores

da relação água/cimento ou de ruídos experimentais. Os resultados obtidos nestas análises estão apresentados nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão para as amostras com cimento CPV

Fator	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob	Inf. Sig
Relação água/cimento	112,57	2	56,29	12,75611	0,463%	Sim
Erro	30,89	7	4,41	-	-	-
Total	143,46	9	-	-	-	-

Tabela 13 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão para as amostras com cimento CPIV

Fator	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob	Inf. Sig
Relação água/cimento	92,55	2	46,28	8,82	1,636%	Sim
Erro	31,49	6	5,25	-	-	-
Total	124,04	8	-	-	-	-

Onde:

Fatores = fatores controláveis do estudo e suas combinações possíveis, mais o erro/ruído experimental;

SQ = soma quadrada dos desvios dos fatores principais, dos grupos e do erro/ruído, dada pelo somatório dos desvios elevado ao quadrado;

NGL = número de graus de liberdade;

MQ = relação entre a soma quadrada dos desvios e seu número de graus de liberdade correspondente;

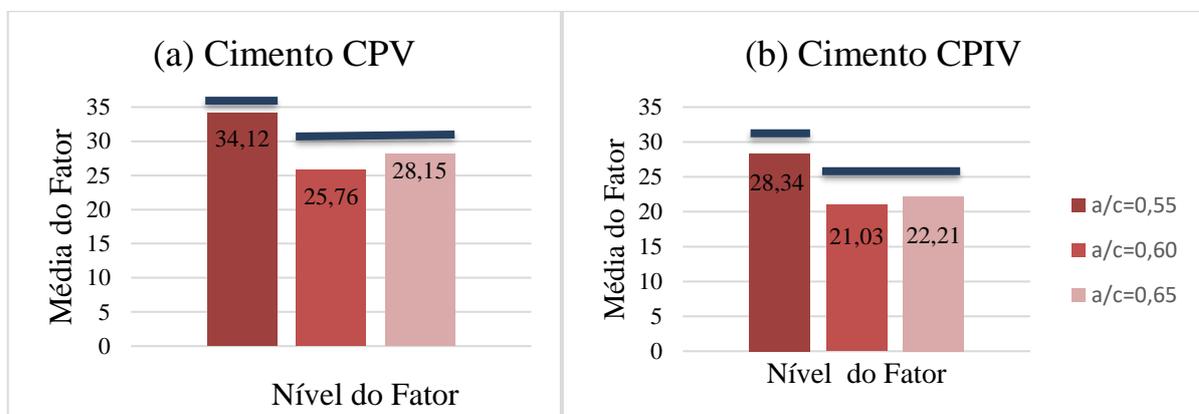
Teste f = cálculo do valor F dado pela relação entre a média quadrada total do grupo ou fator analisado (MQG) e a média quadrada do erro (MQR);

Prob. = probabilidade da variância do fator ou grupo ser devido as alterações no nível dos fatores ou à existência de erro/ruído experimental utilizada.

Inf. Sig = se o fator exerce ou não uma influência significativa sobre o resultado observado.

Como é possível observar nas Tabelas 12 e 13, a análise resultou nas mesmas conclusões para os dois tipos de cimento. As alterações nos valores de relação água/cimento são responsáveis pelas mudanças nos resultados dos ensaios de resistência à compressão. Entretanto, a partir destes resultados foi realizada uma comparação entre médias e verificou-se que, para um nível de significância de 0,05 (95% de certeza), a diferença observada nos valores de resistências para as amostras com relação água/cimento de 0,60 e de 0,65 não são estatisticamente significativos (para os dois tipos de cimento). Isto significa que não é possível distinguir se as alterações nos resultados são devidas à variação na relação água/cimento ou ao ruído experimental (para um nível de significância de 0,05). Seria necessário aumentar a amostragem para diminuir a influência do ruído e, conseqüentemente, obter resultados mais precisos. A Figura 18 ilustra este resultado, as linhas em azul representam quando as médias podem ser consideradas estatisticamente iguais.

Figura 18 – Comparação múltipla das médias do fator água/cimento em relação à resistência à compressão para as amostras com cimento CPV (a) e para as amostras com cimento CPIV (b)



Entretanto, na mesma análise foi possível concluir que a diferença nos valores de resistência obtida nos corpos de prova com relação água/cimento 0,55 é estatisticamente significativa para um nível de significância de 0,05 (95% de certeza). Para estes corpos de prova é possível afirmar que a redução na relação água/cimento provocou o aumento nos valores de resistência à compressão. Este resultado se repetiu para os dois tipos de cimento.

Uma hipótese para este comportamento é que o concreto com relação água/cimento maior, por ser mais fluído, no momento da vibração possa ter expulsado de maneira mais eficiente os

vazios, fazendo com que o material seja menos poroso e, conseqüentemente, provoque um possível aumento na resistência. Os valores obtidos no ensaio de determinação de consistência pelo abatimento do tronco de cone (*slump test*), regulamentado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), apresentados na Tabela 14, colaboram com essa hipótese.

Tabela 14 – Resultados para o ensaio de abatimento

Tipo de Cimento	Água/cimento	slump (mm)
CPV	0,65	110
	0,60	60
	0,55	-
CPIV	0,65	160
	0,60	110
	0,55	60

Com o intuito de verificar a hipótese da porosidade anteriormente levantada, foi realizado um ensaio de velocidade de propagação do pulso ultrassônico (VPU) em três corpos de prova prismáticos de concreto para cada combinação, conforme as orientações da NBR 8802 (ABNT, 2013). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados para o ensaio de ultrassom

Tipo de Cimento	A/C	CP	t médio(μ s)	Velocidade (m/s)	Velocidade Média (m/s)
CPV	0,55	1A	83,73	4777	4773
		2B	83,97	4764	
		3C	83,73	4777	
	0,60	2A	85,53	4677	4642
		2B	86,37	4631	
		2C	86,60	4619	
	0,65	3A	87,27	4584	4652
		3B	84,23	4749	
		3C	86,50	4624	
CPIV	0,55	4A	82,67	4839	4813
		4B	82,43	4852	
		4C	84,27	4747	
	0,60	5A	86,33	4633	4707
		5B	85,47	4680	
		5C	83,20	4808	
	0,65	6A	86,53	4622	4710
		6B	84,53	4732	
		6C	83,73	4777	

Os resultados obtidos para as velocidades de propagação do pulso ultrassônico demonstraram uma variação muito baixa (da ordem de 5%), indicando que os concretos são semelhantes do ponto de vista do ensaio ultrassônico. Desta maneira, não é possível realizar um comparativo entre a qualidade dos corpos de prova através desta ferramenta.

Ainda com o propósito de verificar os vazios do material foi realizado um ensaio para determinar características relativas à porosidade do material. Para isto, utilizou-se os fragmentos resultantes do ensaio de carbonatação natural. É importante ressaltar que este ensaio foi feito em amostras já carbonatadas, e como o fenômeno altera a porosidade do material, as conclusões deste ensaio têm apenas uma função comparativa. Os resultados estão na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados para o ensaio de determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Tipo de cimento	a/c	Absorção (A)	Índice de Vazios (Iv)	Massa Esp. Real (ρ_r)	
CPV	0,55	4,79	12,69	2,65	
		4,78	12,61	2,64	
		3,89	10,35	2,66	
	0,60	5,74	15,85	2,76	
		5,69	15,73	2,77	
		5,67	15,62	2,75	
	0,65	5,69	15,60	2,74	
		5,52	15,31	2,77	
		5,54	15,17	2,74	
		5,82	15,88	2,73	
	CPIV	0,55	5,16	14,07	2,73
			4,89	13,43	2,75
3,86			10,39	2,69	
4,46			12,07	2,70	
0,60		5,35	14,72	2,75	
		5,87	16,14	2,75	
		4,83	13,27	2,75	
		4,62	12,61	2,73	
0,65		5,69	15,75	2,77	
		5,63	15,65	2,78	
		4,63	12,62	2,73	
		5,23	14,27	2,73	

Como é possível constatar a partir dos resultados apresentados na Tabela 16, as características das amostras com relação água/cimento 0,60 e 0,65 apresentam resultados semelhantes. Assim como foi realizado para os resultados de resistência à compressão, foi elaborada uma análise de variância para os valores obtidos para o índice de vazios, absorção e massa específica real. Os

resultados deste processo estão apresentados nas Tabelas 17, 18 e 19 para o cimento CPV e nas Tabelas 20, 21 e 22 para o cimento CPIV.

Tabela 17 – Análise de variância dos resultados de índice de vazios das amostras com cimento CPV

Fator	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob	Inf. Sig
Relação água/cimento	29,02	2,00	14,51	26,25	0,056%	Sim
Erro	3,87	7,00	0,55			
Total	32,89	9,00				

Tabela 18 – Análise de variância dos resultados de absorção das amostras com cimento CPV

Fator	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob	Inf. Sig
Relação água/cimento	2,93	2,00	1,47	17,10	0,202%	Sim
Erro	0,60	7,00	0,09			
Total	3,53	9,00				

Tabela 19 – Análise de variância dos resultados de massa específica real das amostras com cimento CPV

Fator	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob	Inf. Sig
Relação água/cimento	0,02	2,00	0,01	54,08	0,006%	Sim
Erro	0,00	7,00	0,00			
Total	0,02	9,00				

Tabela 20 – Análise de variância dos resultados de índice de vazios das amostras com cimento CPIV

Fator	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob	Inf. Sig
Relação água/cimento	9,26	2,00	4,63	2,27	15,867%	Não
Erro	18,32	9,00	2,04			
Total	27,57	11,00				

Tabela 21 – Análise de variância dos resultados de absorção das amostras com cimento CPIV

Fator	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob	Inf. Sig
Relação água/cimento	1,08	2,00	0,54	2,20	16,676%	Não
Erro	2,20	9,00	0,24			
Total	3,28	11,00				

Tabela 22 – Análise de variância dos resultados de massa específica real das amostras com cimento CPIV

Fator	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob	Inf. Sig
Relação água/cimento	0,00	2,00	0,00	2,25	16,078%	Não
Erro	0,00	9,00	0,00			
Total	0,01	11,00				

As análises apontam que a relação água/cimento tem uma influência significativa nos resultados encontrados para os índices de vazios, absorção e massa específica real das amostras produzidas com cimento CPV, para um nível de significância de 0,05. Por outro lado, para os corpos de prova com cimento CPIV a análise verificou que houve uma variabilidade maior nos resultados o que não permite diferenciar o ruído experimental das variações obtidas pelas variações na relação água/cimento.

Após a análise de variância verificou-se, através de uma comparação entre médias (apenas para o cimento CPV), que, assim como acontece com os resultados de resistência à compressão, não é possível diferenciar estatisticamente as amostras de relação água/cimento 0,60 e 0,65 no que se refere a absorção de água, índice de vazios e massa específica real (Figuras 19, 20 e 21), para um nível de significância de 0,05. É importante ressaltar que devido ao fato da carbonatação ser altamente influenciada pela porosidade do concreto, é prudente considerar as características semelhantes das amostras neste aspecto nas análises. Isto provavelmente ocorre devido à melhor expulsão dos vazios nas amostras com concreto mais fluído ($a/c = 065$).

Figura 19 – Comparação múltipla das médias do fator água/cimento em relação ao índice de vazios para as amostras produzidas com cimento CPV

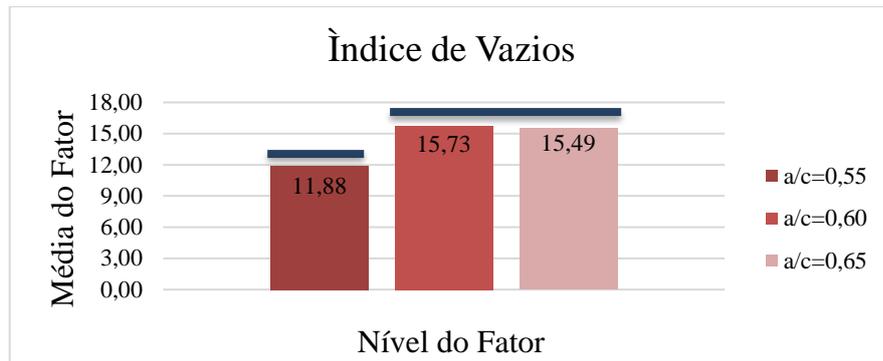


Figura 20 – Comparação múltipla das médias do fator água/cimento em relação à absorção para as amostras produzidas com cimento CPV

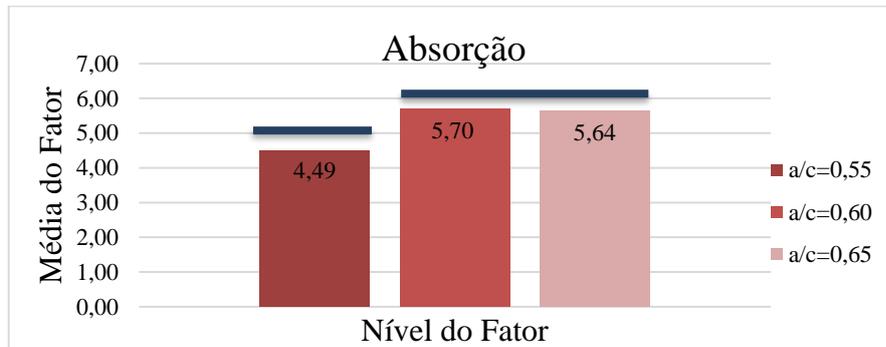
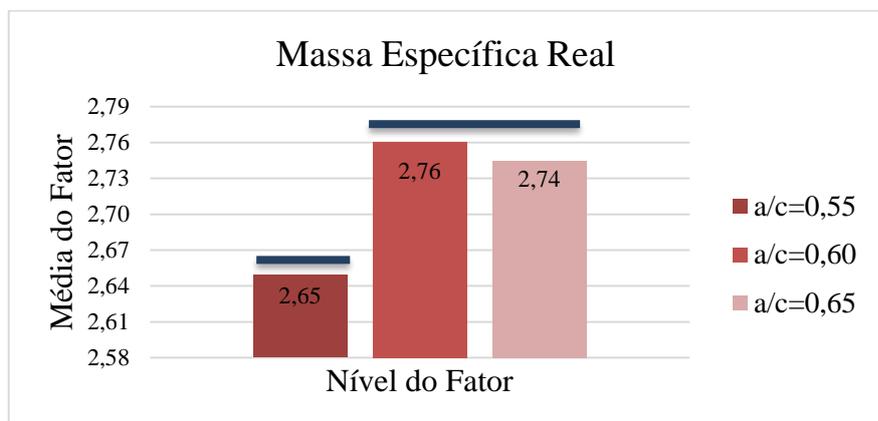


Figura 21 – Comparação múltipla das médias do fator água/cimento em relação à massa específica real das amostras produzidas com cimento CPV



5.2 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Neste item são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos nos ensaios de medição da profundidade de carbonatação realizados tanto nas amostras produzidas em laboratório como nas estruturas existentes.

5.2.1 Profundidade de carbonatação das amostras de laboratório

Os corpos de prova foram alocados nos dois ambientes de exposição no mesmo dia, as datas dos ensaios de medição de profundidade de carbonatação com indicador de pH, assim como a idade das amostras no dia do ensaio estão apresentadas na Tabela 23. Por limitações experimentais não foi possível ensaiar os corpos de prova do Campus do Centro e do Campus do Vale nas mesmas datas.

Tabela 23 – Datas de realização dos ensaios de profundidade de carbonatação

Campus Centro		Campus do Vale	
Data	Idade (dias)	Datas	Idade (dias)
31/08/2018	28	30/08/2018	27
03/10/2018	61	04/10/2018	62
06/11/2018	95	05/11/2018	94
01/02/2019	182	30/01/2019	180
30/04/2019	270	29/04/2019	269
27/06/2019	328	28/06/2019	329

Os resultados obtidos nos ensaios de medição de profundidade de carbonatação estão ilustrados na Figura 22 para as amostras com cimento CPV e na Figura 23 para os corpos de prova moldados com cimento CPIV. Os resultados completos estão apresentados no Apêndice A.

Relembrando que para cada combinação (relação água/cimento, tipo de cimento, ambiente e condição de exposição) foram produzidas duas amostras iguais. Para cada amostra eram realizadas oito leituras (duas em cada face da amostra) e calculado o valor médio destas leituras. Os pontos no gráfico representam a média entre esses valores médios das duas amostras que tinham mesmas características e mesmas condições de exposição (amostras irmãs). A linha

tracejada é uma função logarítmica que tem como objetivo apenas visualizar o avanço da frente de carbonatação nas amostras produzidas em laboratório com base nos resultados obtidos nos ensaios.

Quatro amostras alocadas no Campus Centro desprotegidas da chuva não foram localizadas no último dia de ensaio (aos 328 dias), foram estas, uma amostra com cimento CPV e relação água/cimento 0,65, uma amostra com cimento CPIV e relação água/cimento 0,60, e as duas amostras iguais com cimento CPV e relação água/cimento 0,60. Para a combinação onde só uma das amostras foi perdida, utilizou-se o resultado de profundidade de carbonatação da amostra que sobrou (ao invés da média entre as duas amostras irmãs) e no caso da combinação onde não foi possível realizar a leitura em nenhuma das duas amostras, o resultado não foi apresentado no gráfico.

Figura 22 – Avanço da frente de carbonatação nas amostras com cimento CPV localizadas no Campus Centro e cobertas (a) localizadas no Campus Centro e descobertas (b) localizadas no Campus do Vale e cobertas (c) e localizadas no Campus do Vale e descobertas (d)

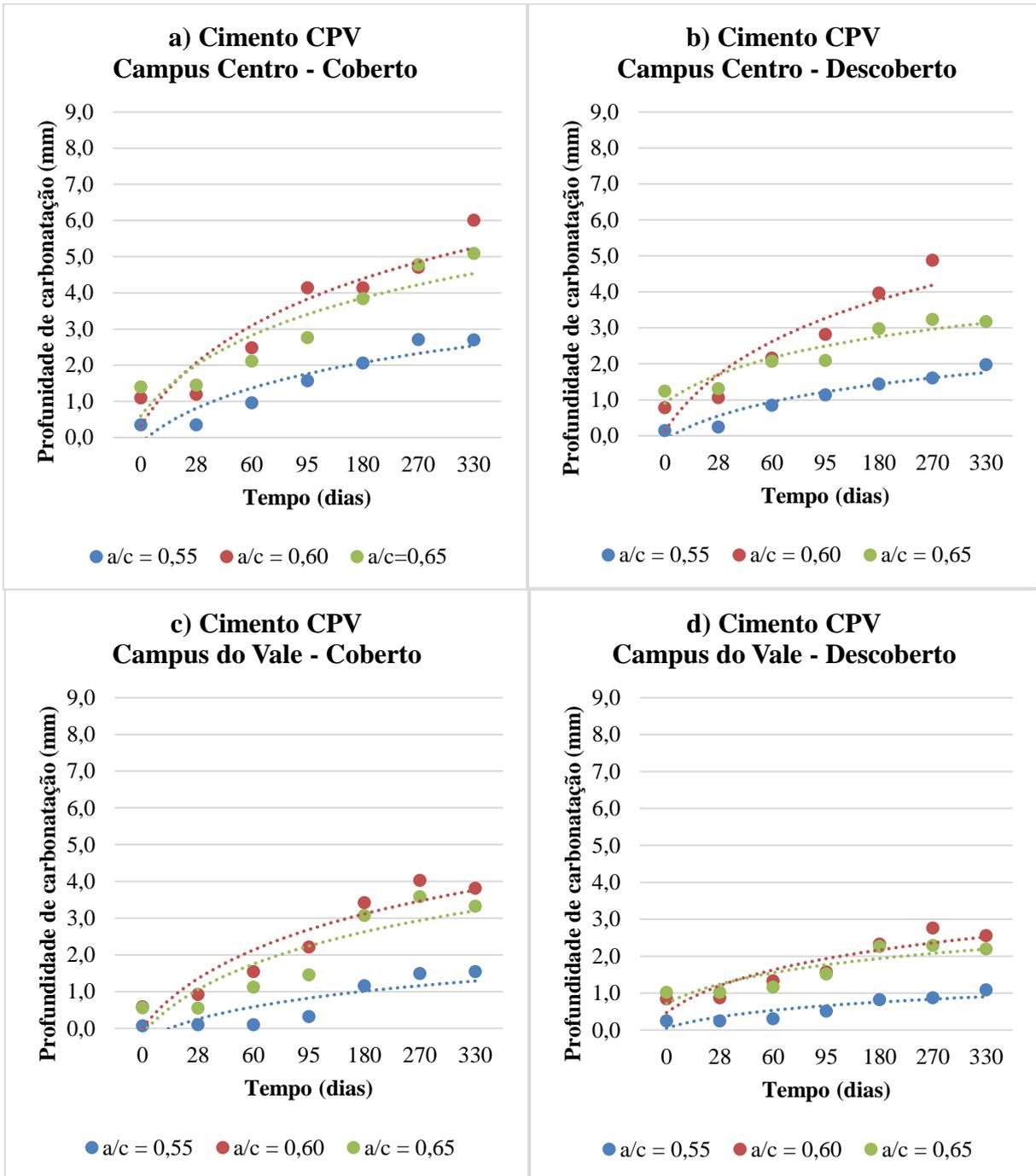
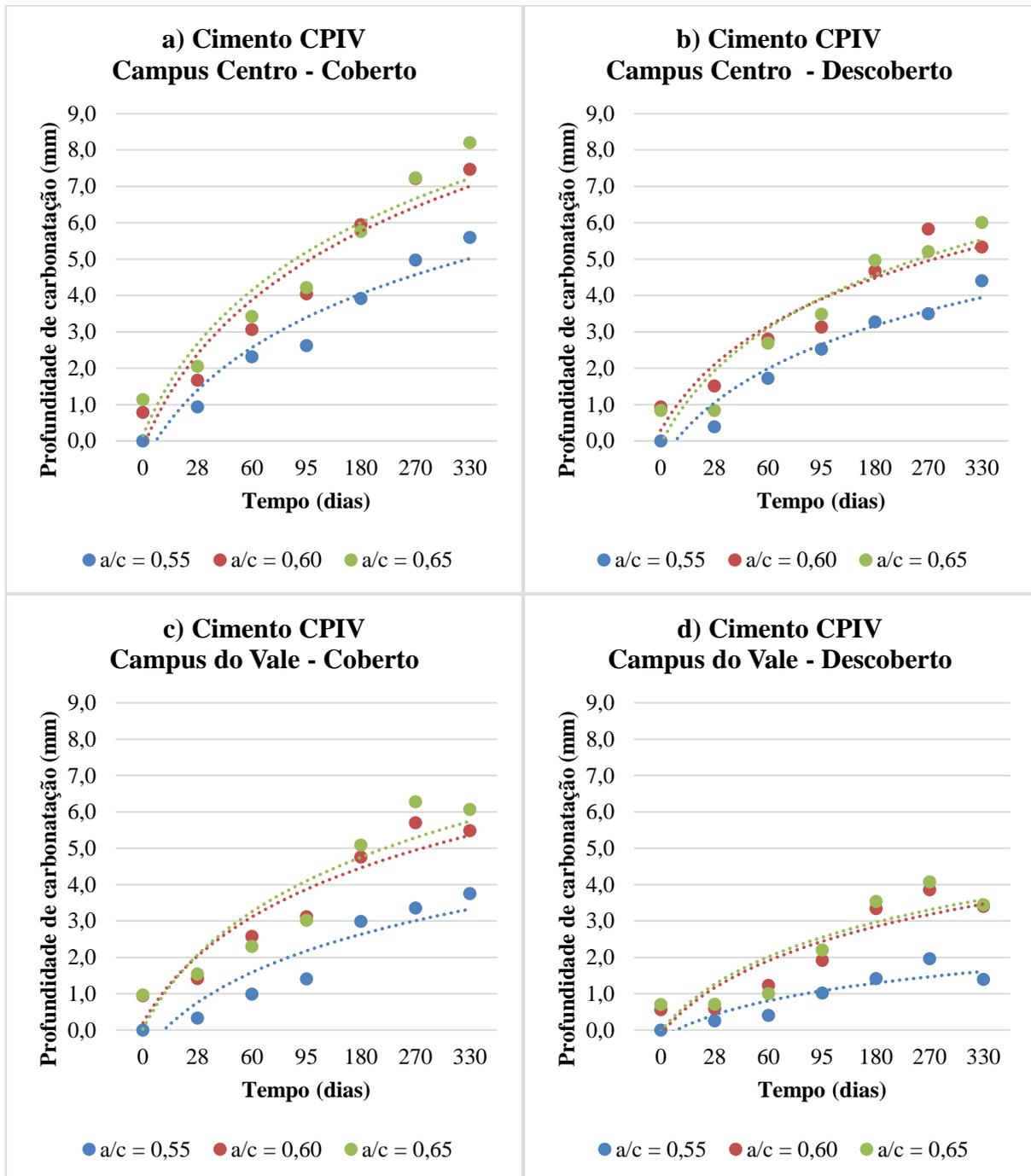


Figura 23 – Avanço da frente de carbonatação nas amostras com cimento CPIV localizadas no Campus Centro e cobertas (a) localizadas no Campus Centro e descobertas (b) localizadas no Campus do Vale e cobertas (c) e localizadas no Campus do Vale e descobertas (d)



A partir dos resultados expostos nas Figuras 22 e 23 é possível observar que o comportamento do avanço da frente de carbonatação nas amostras produzidas em laboratório seguiu o esperado quanto ao tipo de cimento e ao ambiente/condições de exposição. Os corpos de prova com a mesma relação água/cimento e tipo de cimento alocados no ambiente com a maior concentração de CO_2 (campus centro) carbonataram mais que aqueles dispostos no ambiente com menor

concentração de CO₂ (campus do vale). Assim como, aquelas amostras protegidas da chuva também apresentaram maiores resultados para profundidade de carbonatação quando comparadas com as suas semelhantes expostas à ação da chuva. Quanto ao tipo de cimento, as amostras com o cimento CPIV (com maior quantidade de material pozolânico) também apresentaram valores superiores de carbonatação em relação aquelas amostras com cimento CPV para as mesmas relações água/cimento e ambiente de exposição.

Entretanto, sob o ponto de vista da relação água/cimento, o comportamento das amostras no ensaio de profundidade de carbonatação foi diferente do esperado, porém coerente com os resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão. As amostras com relação água/cimento 0,55 carbonataram menos que as demais com relações água/cimento mais altas quando comparadas com as suas semelhantes em todos os cenários. Assim como ocorreu com os resultados para a resistência à compressão apresentados no item anterior, as amostras com relação água/cimento 0,60 e 0,65 apresentam um comportamento muito semelhante.

Para os corpos de prova produzidas com cimento CPV em todos os cenários as amostras com relação água/cimento 0,60, contrariaram o comportamento esperado de acordo com a literatura e apresentaram profundidades de carbonatação aparentemente superiores àquelas amostras com relação água/cimento 0,65. Por outro lado, os corpos de prova produzidos com cimento CPIV e relação água/cimento 0,65 apresentaram resultados aparentemente superiores para a profundidade de carbonatação quando comparados com os resultados para os corpos de prova com relação água/cimento 0,60, com exceção das idades iniciais da condição de exposição desprotegida da chuva no Campus Centro (Figura 23 b).

Entretanto, é prudente ressaltar que, segundo a RILEM CPC-18 (1988), variações abaixo de 0,5 mm na carbonatação não são diferenciáveis devido ao método de leitura. Para aqueles corpos de prova que apresentaram diferenças nos valores de profundidade de carbonatação próximas de 0,5 mm não é possível afirmar que as alterações são devidas a um aumento da frente de carbonatação ou à imprecisão nas leituras

Com intuito de verificar a influência dos fatores controláveis (tipo de cimento, relação água/cimento, local e condição de exposição) no comportamento do avanço da frente de carbonatação foi realizada uma análise de variância nos dados obtidos experimentalmente. Esta análise permite também verificar o efeito da interação entre diferentes fatores, indicando se

determinadas combinações favorecem ou prejudicam o avanço da frente de carbonatação A análise foi feita utilizando como base os dados referentes aos 270 dias de exposição. Optou-se por este conjunto de dados pois quanto maiores as profundidades menores as imprecisões nas leituras, diminuindo a influência do ruído experimental. Outro motivo para esta escolha está relacionado com o fato dos dados com o maior tempo de exposição (330 dias) não estarem completos. Os resultados obtidos na análise de variância estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Análise de variância para os resultados de profundidade de carbonatação das amostras de laboratório

Fatores	SQ	NGL	MQ	Teste F	Probabilidade	Efeito
A -Local	144,31	1	144,31	42,06	0,00%	Significativo
B - Cond. Exposição	169,87	1	169,87	49,51	0,00%	Significativo
C - Tipo Cimento	302,46	1	302,46	88,15	0,00%	Significativo
D- Relação a/c	424,81	2	212,40	61,90	0,00%	Significativo
Interação AB	1,02	1	1,02	0,30	58,58%	Não Signif.
Interação AC	5,13	1	5,13	1,50	22,21%	Não Signif.
Interação AD	8,86	2	4,43	1,29	27,62%	Não Signif.
Interação BC	14,73	1	14,73	4,29	3,90%	Significativo
Interação BD	9,05	2	4,52	1,32	26,89%	Não Signif.
Interação CD	3,08	2	1,54	0,45	63,83%	Não Signif.
Interação ABC	0,01	1	0,01	0,00	95,61%	Não Signif.
Interação ABD	6,91	2	3,46	1,01	36,62%	Não Signif.
Interação BCD	1,04	2	0,52	0,15	86,00%	Não Signif.
Interação ACD	0,27	2	0,14	0,04	96,14%	Não Signif.
Interação ABCD	2,65	2	1,33	0,39	67,99%	Não Signif.
Erro/ruído	203,72	360	0,57	-	-	-
Total	1297,91	383	-	-	-	-

A probabilidade foi calculada a partir da distribuição F de Fischer-Snedecor com um nível de significância de 0,05 (95% de certeza) com o objetivo de testar a hipótese nula, que propõe que não há diferença significativa entre os grupos analisados. Desta maneira, todas as

probabilidades inferiores à 5% representam que existe influência significativa dos fatores ou interações analisadas, negando a hipótese nula.

Conforme o esperado e de acordo com a literatura, todos os fatores controláveis adotados na pesquisa se mostraram significativos. Em uma análise prévia apenas dos desvios provocados pelos fatores principais, já foi possível observar que os desvios calculados para os fatores relacionados às características dos materiais (relação água/cimento e tipo de cimento) se mostraram mais significativos que as condições do meio ambiente onde se encontravam as amostras (local e condição de exposição). Pauletti (2009) conduziu um estudo sobre carbonatação natural e acelerada que conteve amostras no mesmo lugar de exposição da presente pesquisa (Campus Centro) para um período de exposição de 58 meses. A análise estatística da autora também resultou em influência maior para as características das amostras (relação água/cimento e tipo de cimento) do que as características ambientais (no caso apenas a condição de exposição, ambiente interno e externo).

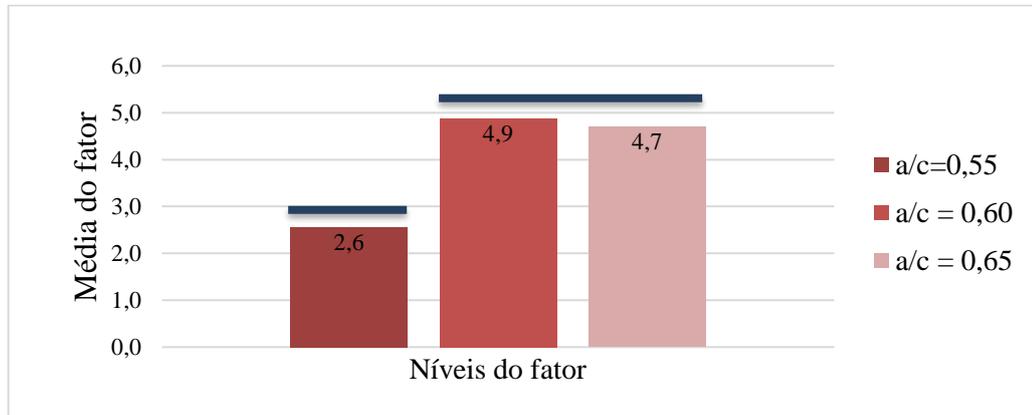
Também é possível observar pela Tabela 24 que as interações entre os fatores não se mostraram estatisticamente significativas com exceção da interação entre a condição de exposição e o tipo de cimento. Esta interação será discutida ao longo deste capítulo.

Quanto ao erro/ruído experimental, a partir da Tabela 24 é possível perceber que o resultado da soma quadrada é seis vezes menor que a soma quadrada total. Entretanto, pode-se observar que a soma quadrada dos erros é superior a aquela calculada para as circunstâncias de exposição (local e condição) o que mostra que eventuais problemas e limitações durante a execução dos ensaios representam uma parcela significativa quando comparado aos efeitos já identificados dos fatores principais na resistência do concreto. É prudente ressaltar que existe a possibilidade de os ruídos experimentais mascararem a real influência das variáveis nos resultados.

Assim como foi feito para os resultados dos ensaios de resistência à compressão e de obtenção da massa específica, após a análise de variância foi realizado um comparativo entre médias para os fatores e interações que se demonstraram com influência significativa. A constatação foi semelhante àquela obtida para os resultados de resistência à compressão: estatisticamente, não é possível afirmar que as mudanças nos valores de profundidade de carbonatação das amostras com relação água/cimento de 0,60 e 0,65 são devidas a alteração no fator, podendo ser consideradas iguais. Por outro lado, esta constatação não é válida para as amostras com relação

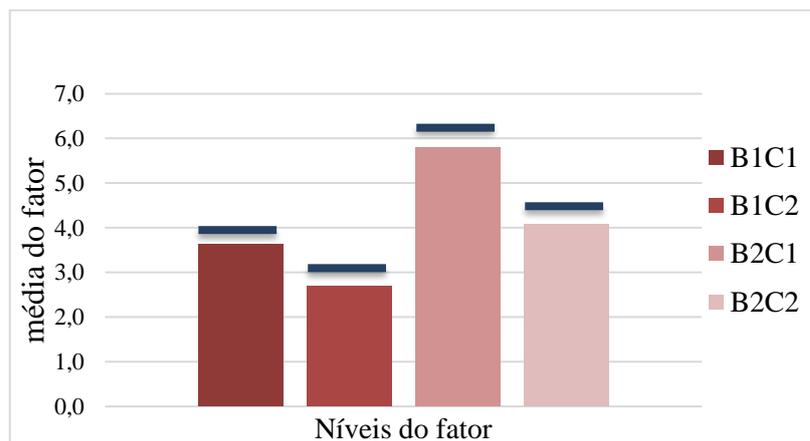
água/cimento 0,55. Neste caso, a alteração deste fator pode ser considerada significativa para as variações nos resultados médios. Esta situação está ilustrada na Figura 24.

Figura 24 – Comparação múltipla de médias do fator relação água/cimento em relação à profundidade de carbonatação



Este mesmo tipo de análise foi realizada para a interação entre o fatores condição de exposição e tipo de cimento que se mostrou estatisticamente significativa na análise de variância. O resultado deste comparativo está ilustrado na Figura 25. Onde B representa o fator de condição de exposição, sendo B1 a condição protegido da chuva e B2 desprotegido, e C representa o fator tipo de cimento, sendo C1 e C2 os cimentos CPV e CPIV, respectivamente.

Figura 25 – Comparação múltipla de médias das interações dos fatores Condição de exposição (Fator B) e Tipo de cimento (Fator C)



Como é possível observar na Figura 25, a interação se mostrou significativa para todas as combinações. Entretanto, devido ao fato de o ruído experimental ser significativo nos resultados do ensaio de profundidade de carbonatação seria necessário ampliar os resultados (aumentar o número de amostras ou medições) para reduzir a interferência do ruído para obter conclusões

mais precisas sobre a influências das interações entre os fatores controláveis da pesquisa nos resultados experimentais.

5.2.2 Profundidade de carbonatação das estruturas existentes

Neste item são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de medição de profundidade de carbonatação nas edificações escolhidas para a realização do presente trabalho, apresentadas no capítulo 4 (item 4.3).

A primeira edificação é o prédio do Centro de Biotecnologia no Campus do Vale, inicialmente o objetivo era definir um valor de profundidade de carbonatação para a toda a estrutura, entretanto, por se tratar de um ensaio destrutivo existia uma limitação no número de pontos para medir a profundidade de carbonatação. Foram autorizados ensaios em apenas seis pontos do prédio. Primeiramente realizou-se o ensaio em três pilares diferentes do prédio e observou-se uma variabilidade muito grande nos resultados. Considerando tal fato, optou-se por analisar apenas dois elementos estruturais da edificação. Foram escolhidos dois pilares de dimensão transversal 40 cm por 30 cm, um protegido da chuva e o outro exposto à chuva, ambos próximos aos locais de exposição das amostras. O primeiro pilar, Figura 26(a) é da estrutura da passarela de acesso ao prédio e encontra-se na frente da entrada do Centro de Biotecnologia, e o segundo também um pilar da passarela de acesso à edificação (Figura 26(b)).

Figura 26 – Pilares do Centro de Biotecnologia escolhidos para a realização dos ensaios de medição de profundidade de carbonatação protegido da chuva (a) exposto à chuva (b)



Os resultados obtidos nos ensaios de profundidade de carbonatação para os pilares do Centro de Biotecnologia estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultados de profundidade de carbonatação dos pilares do Centro de Biotecnologia

Local	Condição de exposição	Profundidade de carbonatação (mm)
Vale	Descoberto	9,70
		9,30
		9,30
	Coberto	15,40
		14,20
		14,70

A segunda edificação analisada, o Prédio Novo da Escola de Engenharia, não foram localizados elementos de concreto armado sem revestimento na fachada nem na cobertura do prédio. Desta maneira optou-se por medir a carbonatação na casa de máquinas e em uma parte coberta na cobertura do prédio. Trata-se de uma área cujo acesso de pessoas é pouco frequente (apenas eventuais equipes de manutenção) e com aberturas que garantem a circulação de ar. Foram realizados os ensaios de medição de profundidade de carbonatação em duas vigas e em uma laje. Os resultados obtidos foram inferiores a 3 mm em todos os elementos analisados. A Figura 27 apresenta a profundidade de carbonatação obtida em uma das vigas ensaiadas.

Figura 27 – Ensaio de medição de profundidade de carbonatação em uma viga no Prédio Novo da Escola de Engenharia



Os elementos da cobertura do Prédio Novo da Escola de Engenharia apresentaram um valor de profundidade de carbonatação inferior àqueles obtidos para as amostras executadas em laboratório cujo tempo de exposição é muito inferior ao dos elementos ensaiados. Estes resultados impossibilitam uma comparação entre o prédio e as amostras através da carbonatação (objetivo do trabalho). Este fato ocorre provavelmente devido à alguma característica na composição química dos materiais que compõem a estrutura, ou a utilização de algum produto na superfície dos elementos ensaiados que dificulta a entrada do gás carbônico. Entretanto, seriam necessários estudos e ensaios complementares para verificar a real razão da baixa carbonatação na estrutura considerando sua idade (aproximadamente 59 anos). Para fins desta pesquisa, considerando as limitações de tempo, não foi possível realizar estes estudos.

Após a apresentação e discussão de todos os dados experimentais necessários para a realização da pesquisa, a próxima etapa do trabalho consiste na análise final para alcançar o objetivo proposto, de relacionar os dados de profundidade de carbonatação das amostras moldadas em laboratório com os das estruturas existentes. Esta análise está apresentada no próximo capítulo.

6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Neste capítulo é apresentado como foi feita a análise final, realizada para atingir o objetivo proposto pelo trabalho, e seu resultado. Lembrando que o trabalho tem como finalidade relacionar os valores de profundidade de carbonatação obtidos para amostras e aqueles observados nas estruturas. O propósito é verificar a possibilidade de se obter dados relativos às características de estruturas existentes através de ensaios de medição de profundidade de carbonatação.

Em posse dos dados de carbonatação natural dos corpos de prova elaborados em laboratório, para o tempo de exposição de 328 e 329 dias, é possível representar graficamente o avanço da frente de carbonatação nas amostras para este período inicial. Entretanto, para a análise proposta nos objetivos do trabalho é necessário obter o comportamento das amostras em relação à carbonatação até a idade das estruturas analisadas. Para isto foi utilizado o modelo de previsão de avanço da frente de carbonatação elaborado por Possan (2010) e a equação simplificada baseada na lei de Fick (equação 7).

Inicialmente, tinha-se como objetivo utilizar os dados obtidos para as amostras de laboratório para calibrar a equação proposta por Possan (2010). Para este fim, foram calculados valores de profundidade de carbonatação com o Modelo de Possan (2010) utilizando como dados de entrada aqueles obtidos para amostras (apresentados no capítulo 5) para o tempo que estas ficaram expostas (328 dias para o Campus Centro e 329 dias para o Campus do Vale). Após esta etapa, os valores foram comparados com aqueles obtidos experimentalmente.

Relembrando que algumas amostras foram alocadas no laboratório antes de irem para os seus respectivos ambientes de exposição. Este período em laboratório gerou uma profundidade de carbonatação inicial que foi denominada como carbonatação para o tempo $t = 0$. Os valores em dias para esta diferença entre as concretagens estão apresentados na Tabela 26. Estes valores iniciais foram descontados daqueles que foram observados para comparar com os resultados calculados pelo modelo.

Tabela 26 – Diferença em dias entre as concretagens das amostras de laboratório

Tipo de Cimento	Relação a/c	Data Concretagem	t=0 (dias)
CPV	0,65	21/mai	0
	0,60	05/jun	15
	0,55	07/jun	17
CPIV	0,65	14/jun	24
	0,60	21/jun	31
	0,55	05/jul	45

A Figura 28 até a Figura 39 ilustram os comparativos feitos entre os valores obtidos experimentalmente para as amostras e aqueles calculados através do Modelo de Possan (2010) para todas as condições estudadas. Os valores calculados estão apresentados no Apêndice B. É importante ressaltar sobre as Figuras 28 até 39 que as linhas contínuas dos gráficos representam o avanço da frente de carbonatação calculado pelo Modelo, enquanto as linhas tracejadas, por outro lado, têm como função apenas permitir a melhor visualização do comportamento da carbonatação observado nas amostras, não representando numericamente o fenômeno.

Figura 28 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus Centro com cimento CPV e $a/c = 0,55$

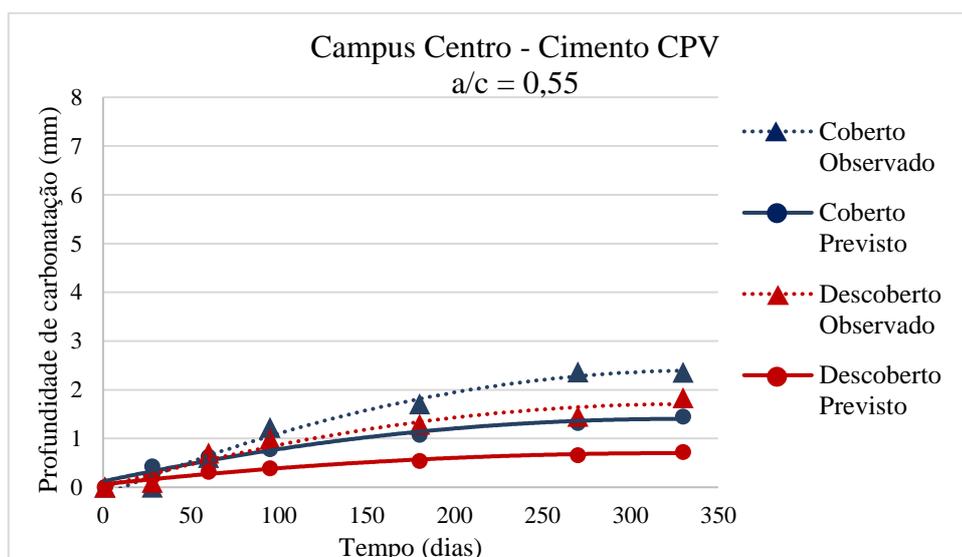


Figura 29 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus Centro com cimento CPV e $a/c = 0,60$

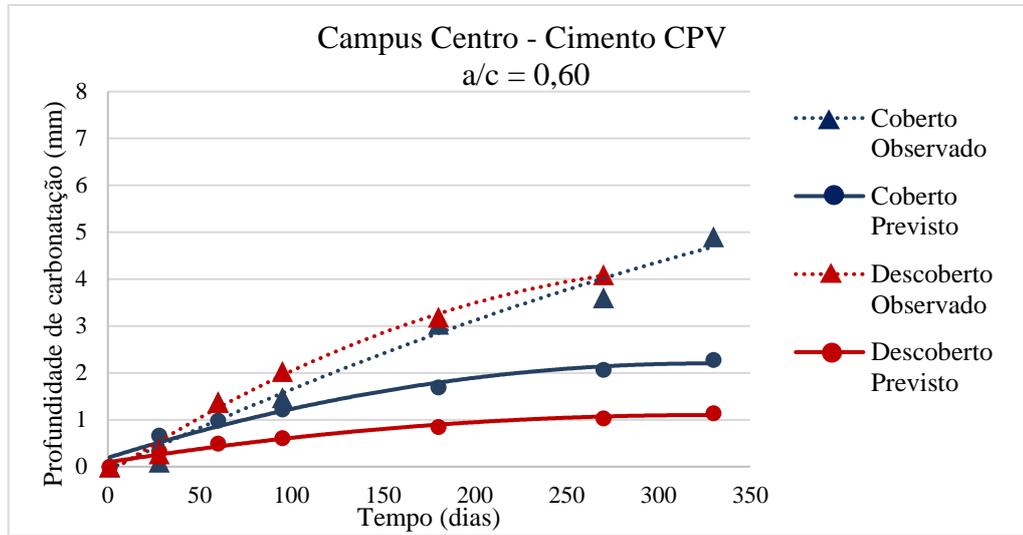


Figura 30 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus Centro com cimento CPV e $a/c = 0,65$

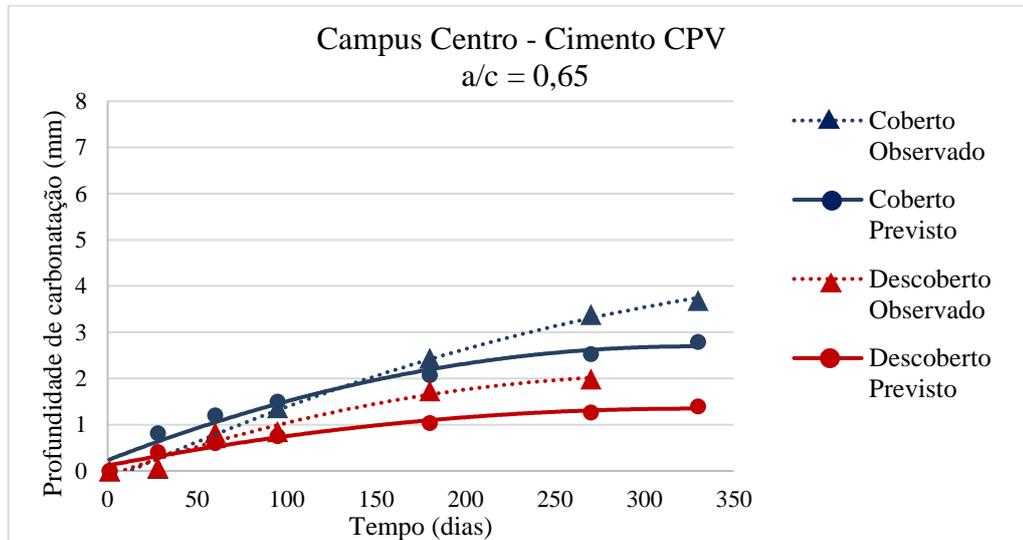


Figura 31 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus do Vale com cimento CPV e $a/c = 0,55$

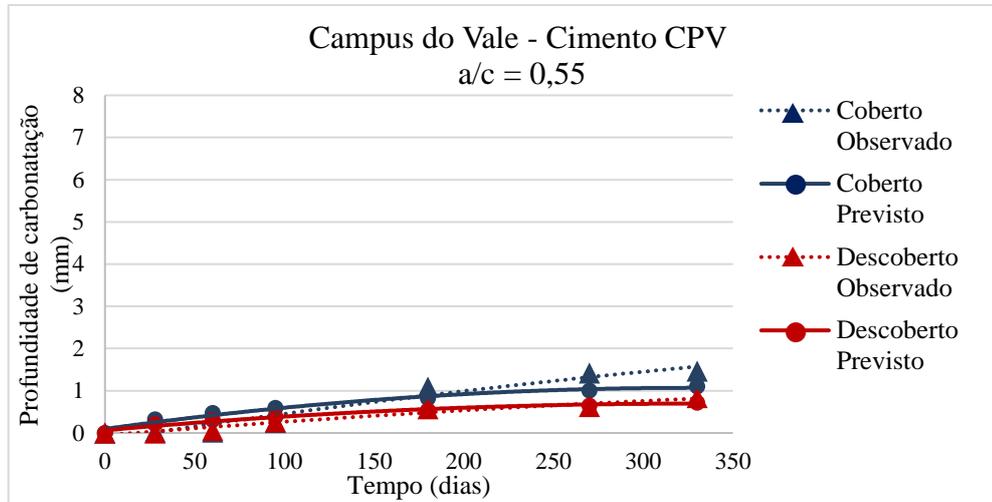


Figura 32 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus do Vale com cimento CPV e $a/c = 0,60$

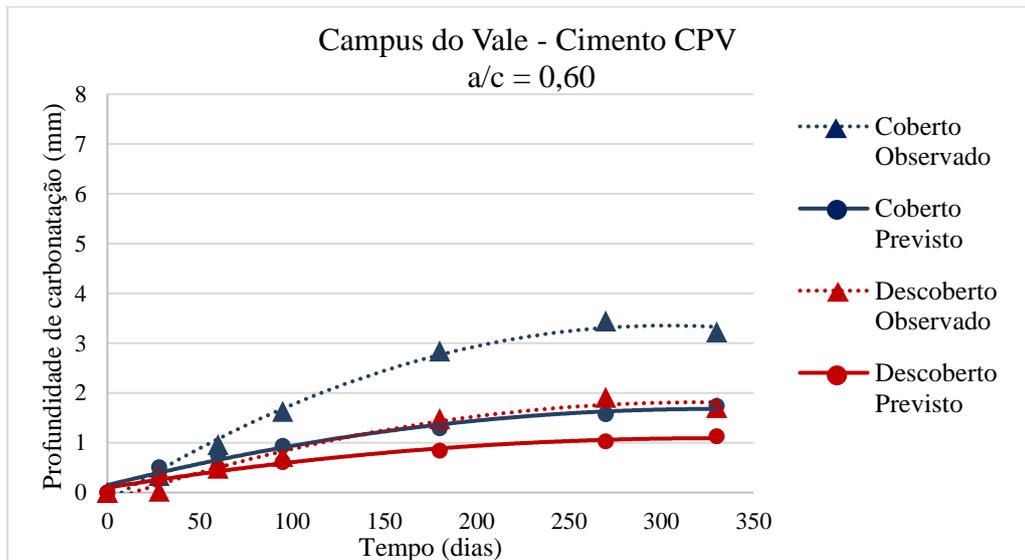


Figura 33 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus do Vale com cimento CPV e $a/c = 0,65$

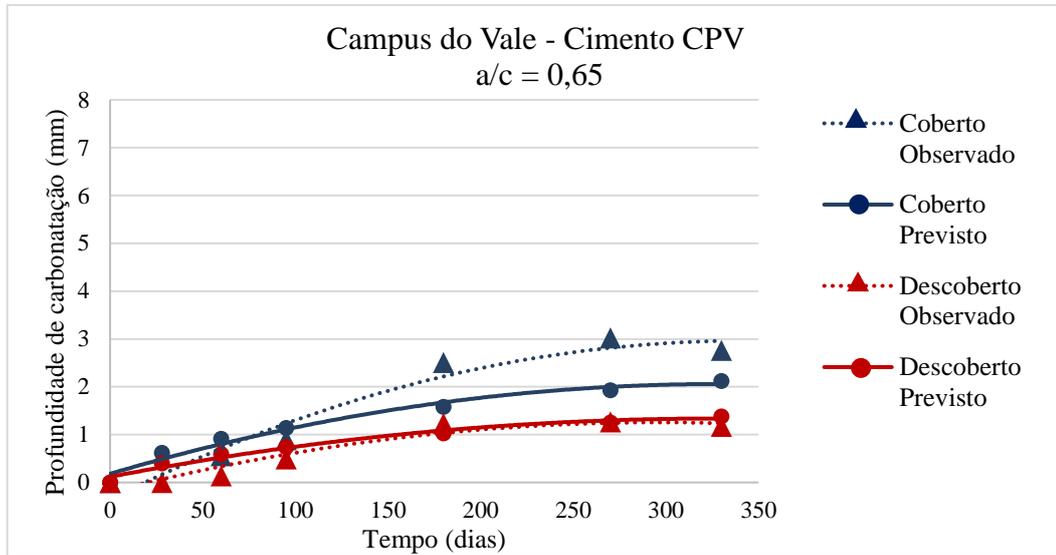


Figura 34 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus Centro com cimento CPIV e $a/c = 0,55$

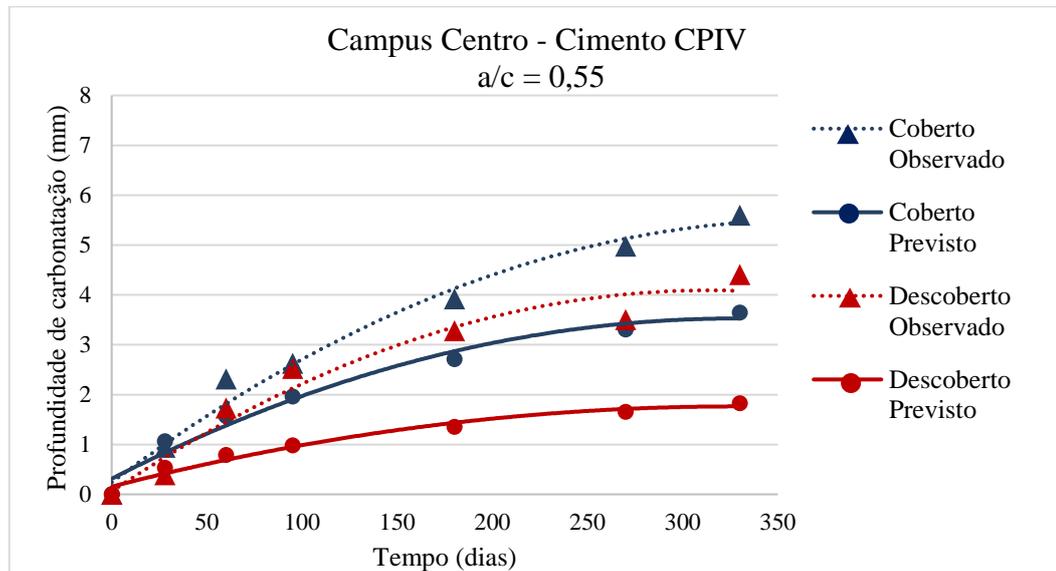


Figura 35 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus Centro com cimento CPIV e $a/c = 0,60$

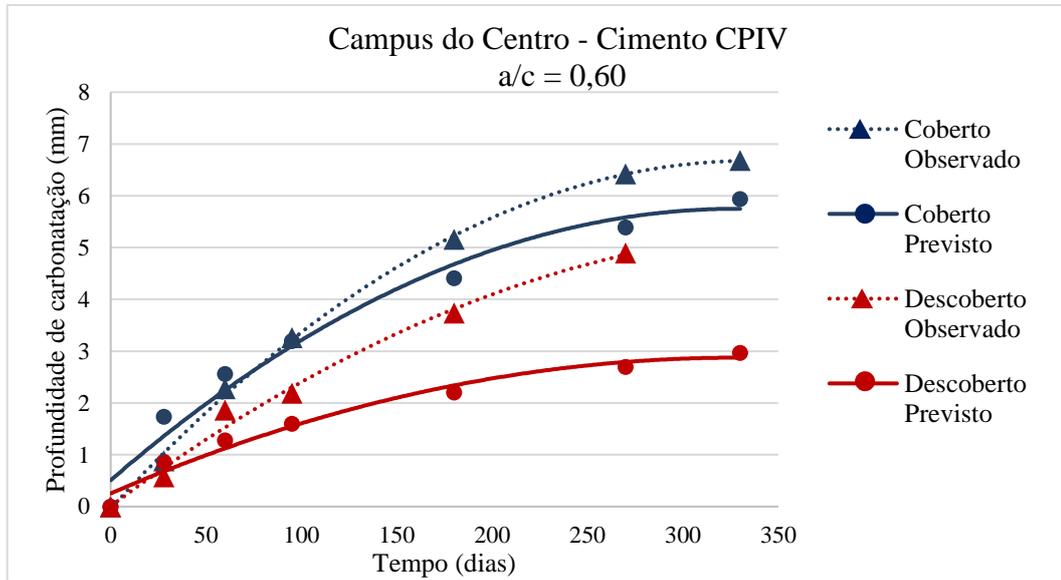


Figura 36 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus Centro com cimento CPIV e $a/c = 0,65$

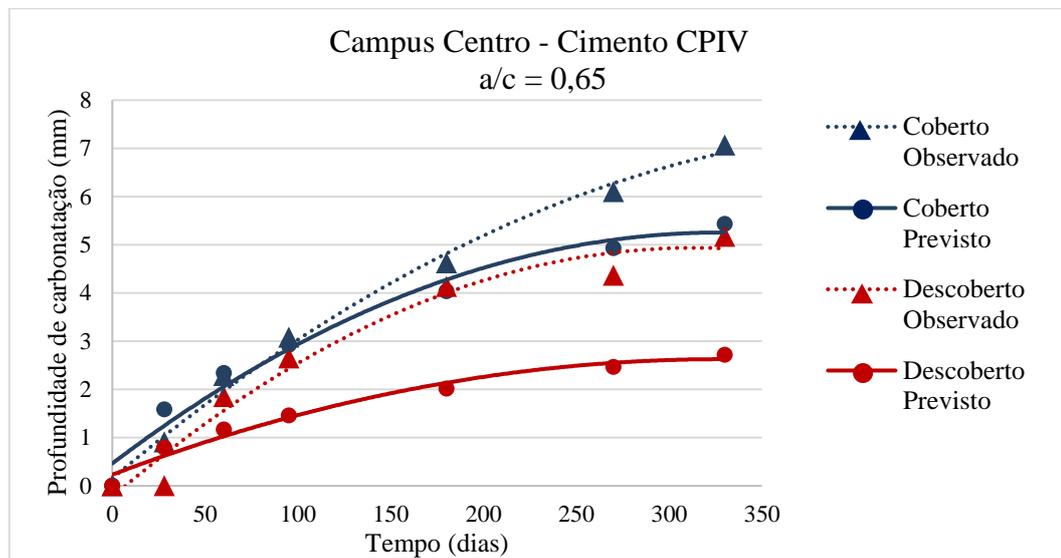


Figura 37 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus do Vale com cimento CPIV e $a/c = 0,55$

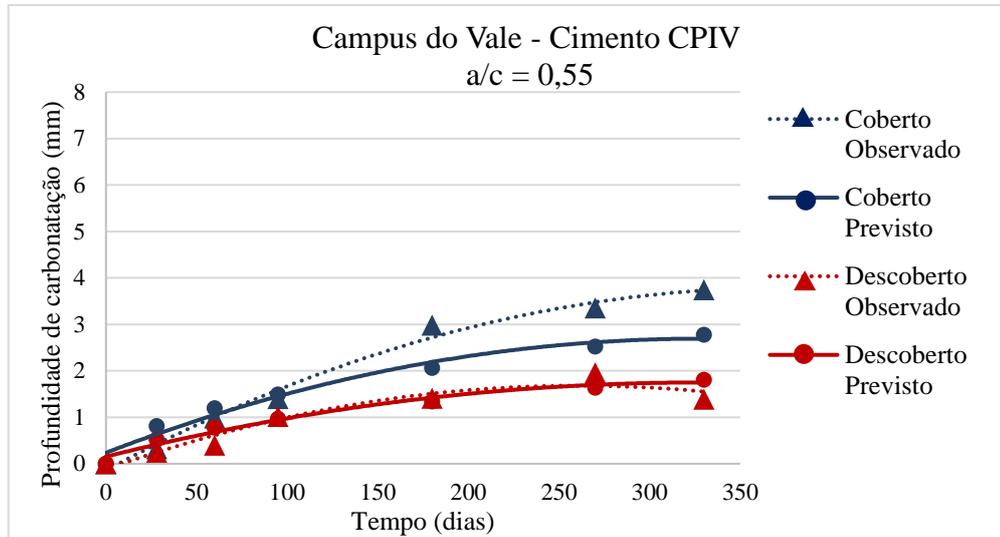


Figura 38 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus do Vale com cimento CPIV e $a/c = 0,60$

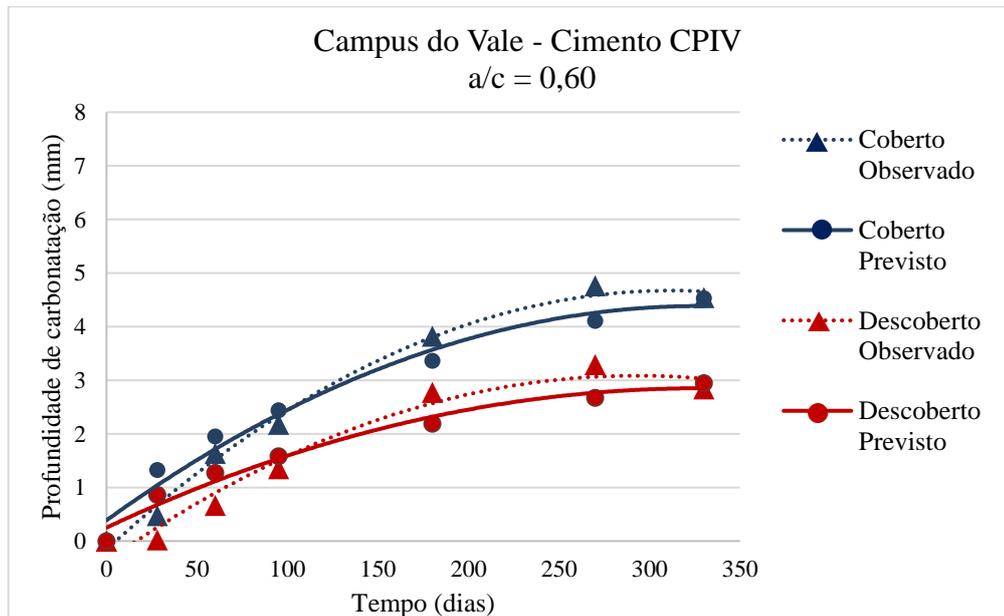
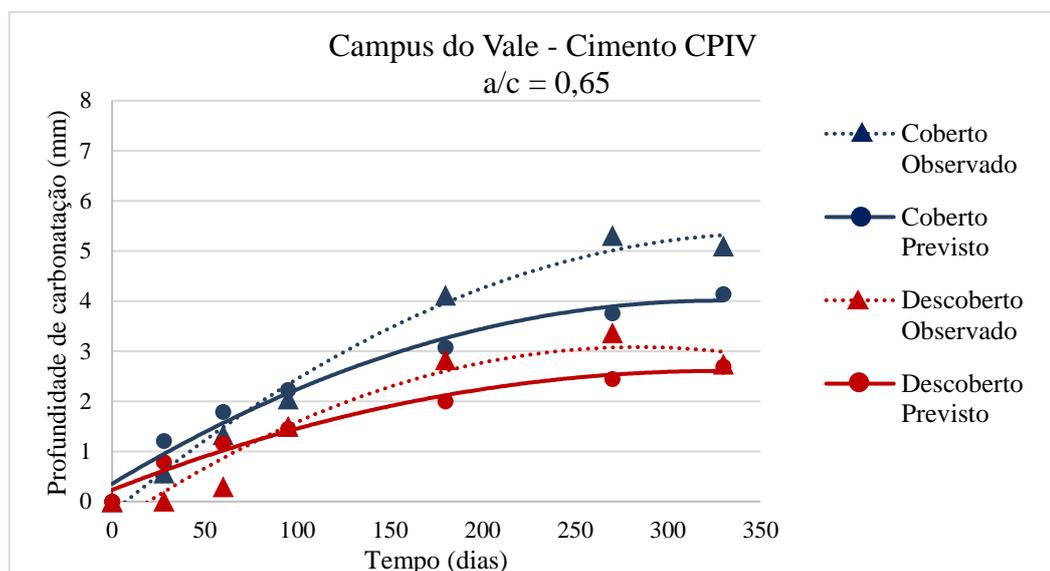


Figura 39 – Comparativo entre os valores de profundidade de carbonatação observados experimentalmente e previstos pelo modelo para as amostras do Campus do Vale com cimento CPIV e $a/c = 0,65$



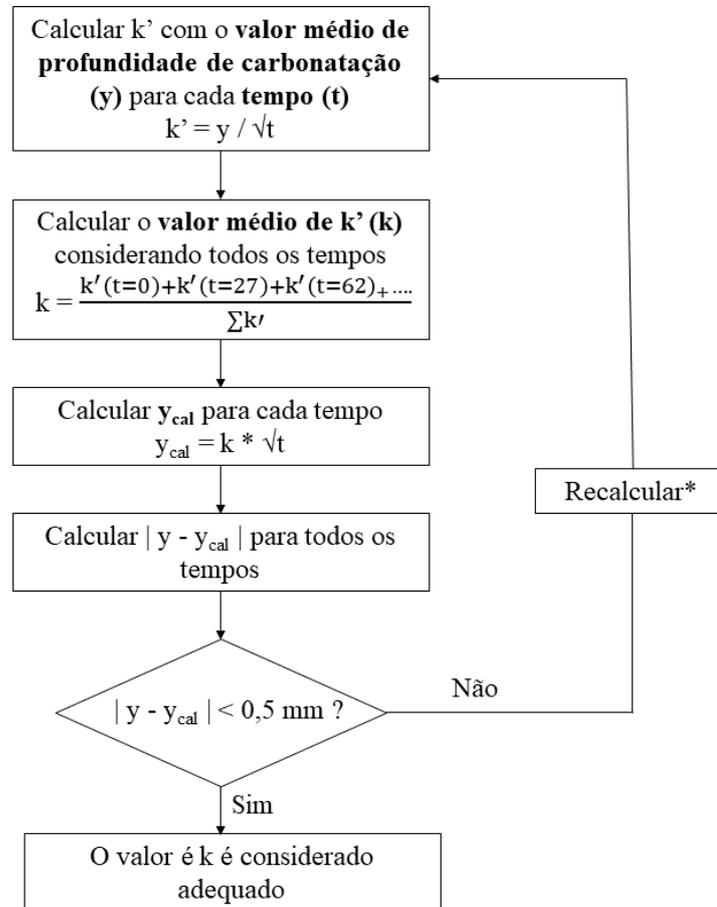
A partir das Figuras 28 até 39 é possível concluir que os valores observados experimentalmente não são semelhantes àqueles calculados através do modelo proposto por Possan (2010). De maneira geral as amostras apresentaram uma frente de carbonatação mais veloz do que a aquela prevista pelo modelo. Relembrando que de acordo com a RILEM CPC-18 (1988) variações abaixo de 0,5 mm são consideradas aceitáveis devido à imprecisão do método de leitura da carbonatação. A diferença entre os valores experimentais e os calculados para a profundidade de carbonatação superou os 0,5 mm em quase todas os casos analisados, com exceção das amostras no Campus do Vale e cimento CPV com relação água/cimento 0,55 (nas condições exposto e protegido da chuva) e as amostras do mesmo local e mesmo tipo de cimento com relação água/cimento 0,65 e condição exposto à chuva.

Outra constatação que pode ser feita a partir das Figuras 28 até 39 está relacionada com o fato de não ser possível observar padrão de comportamento da diferença numérica entre os valores previstos e os observados para a carbonatação. A distância entre os valores não aparenta seguir nenhuma lógica matemática que permita ajustes no modelo para que este represente o comportamento das amostras. Considerando que o modelo foi elaborado com base em dados de carbonatação com tempos maiores de exposição que a presente pesquisa, uma hipótese é que um intervalo curto de tempo (como 330 dias) não seja adequado para calibrar a equação. Outra hipótese é que o modelo realmente não represente o comportamento das amostras utilizadas nesta pesquisa.

Visto que o ruído experimental tem uma influência muito grande nos dados experimentais de profundidade de carbonatação, calibrar a equação proposta por Possan (2010) baseando-se em dados influenciados por ruído experimental pode mascarar o real comportamento da frente de carbonatação. Desta maneira, optou-se por duas estratégias distintas para prosseguir as análises. A primeira é de utilizar o modelo exatamente como este foi apresentado por Possan (2010), considerando que este representa o avanço da frente de carbonatação, sem a calibração com os dados experimentais para não propagar o ruído experimental. E a segunda estratégia trata-se de utilizar a equação simplificada baseada na lei de Fick (equação 7) para calcular um coeficiente que regula a carbonatação das amostras com base nos resultados experimentais de carbonatação.

Para a segunda estratégia é necessário inicialmente determinar um valor do coeficiente k para a equação 7 para cada uma das condições analisadas. Este coeficiente foi calculado para cada um dos valores de profundidade de carbonatação observados, este valor, que variava de acordo com o tempo, foi chamado de k' . Após calcular o k' para cada um dos períodos de exposição (28, 61, 95, 182, 270 e 328 dias) era escolhido um valor para k baseado nos valores de k' . Então era feita uma verificação em função da diferença entre a profundidade observada e a profundidade calculada pela equação 7 com o valor do k definido. Quando esta diferença fosse inferior à 0,5 mm foi considerado que o k era adequado e representava de maneira satisfatória o comportamento da frente de carbonatação. Em algumas combinações não foi possível adotar um valor de k que fornecesse diferenças inferiores à 0,5 mm para todos os valores de profundidade de carbonatação. Nestas situações se deu preferência a valores de k que gerassem as menores diferenças nos últimos tempos de exposição, esta escolha foi devida ao fato de nos tempos iniciais as leituras de profundidade de carbonatação serem mais difíceis e, conseqüentemente, gerarem maiores erros. A Figura 40 ilustra o processo de cálculo de k .

Figura 40 – Processo de cálculo de k e k'



* Caso k' nunca resulte em $|y - y_{cal}| < 0,5 \text{ mm}$ adotar k' onde as menores diferenças entre y e y_{cal} encontrem-se nos maiores tempos

A Tabela 27 apresenta um exemplo do método explicado anteriormente para a definição dos valores de k' e k para as amostras com cimento CPV localizadas no Campus Centro e protegido da chuva para a relação água/cimento 0,55. Os valores completos para todas as condições estudadas encontram-se no Apêndice C.

Tabela 27 – Cálculo de k' e k para as amostras com cimento CPV expostas no Campus Centro e protegidas da chuva

Condição	Profundidade de carbonatação observada – y (mm)	Tempo (anos)	k'	k	Profundidade de carbonatação calculada - y_{ca} (mm)	$y - y_{cal}$ (mm)
	0,35	0,08	1,26		0,72	-0,4
CPV	0,96	0,17	2,35		1,06	-0,1
Centro	1,58	0,26	3,09		1,33	0,2
Coberto	2,06	0,50	2,93	2,6	1,83	0,2
$a/c = 0,55$	2,71	0,74	3,15		2,24	0,5
	2,71	0,90	2,85		2,46	0,2

Em posse dos valores de k , foi possível calcular a profundidade de carbonatação de todas as condições pesquisada para período superior ao de exposição das amostras pelos dois métodos: pela equação simplificada (Equação 7) e pelo Modelo proposto por Possan (2010). Para o Campus Centro foram calculados valores de carbonatação para até 65 anos, e para o Campus do Vale até 40 anos. Estes valores foram escolhidos com base na idade das edificações pesquisadas nos dois Campus (Prédio Novo da Escola de Engenharia no Campus Centro e Centro de Biotecnologia no Campus do Vale).

Nas Figuras a seguir são apresentados os resultados obtidos pelos dois métodos de cálculo (Modelo de Possan (2010) e equação simplificada). As Figuras 41 e 42 ilustram os valores calculados para a condição Campus Centro protegido da chuva, as Figuras 43 e 44 a condição Campus Centro exposto à chuva, as Figuras 45 e 46 a condição Campus do Vale protegido e da chuva e por último, as Figuras 47 e 48 a condição Campus do Vale desprotegido da chuva. Os valores calculados apresentados nas figuras estão apresentados no Apêndice D.

Figura 41 – Previsão da carbonatação calculada utilizando o modelo proposto por Possan (2010) para o Campus Centro condição protegida da chuva

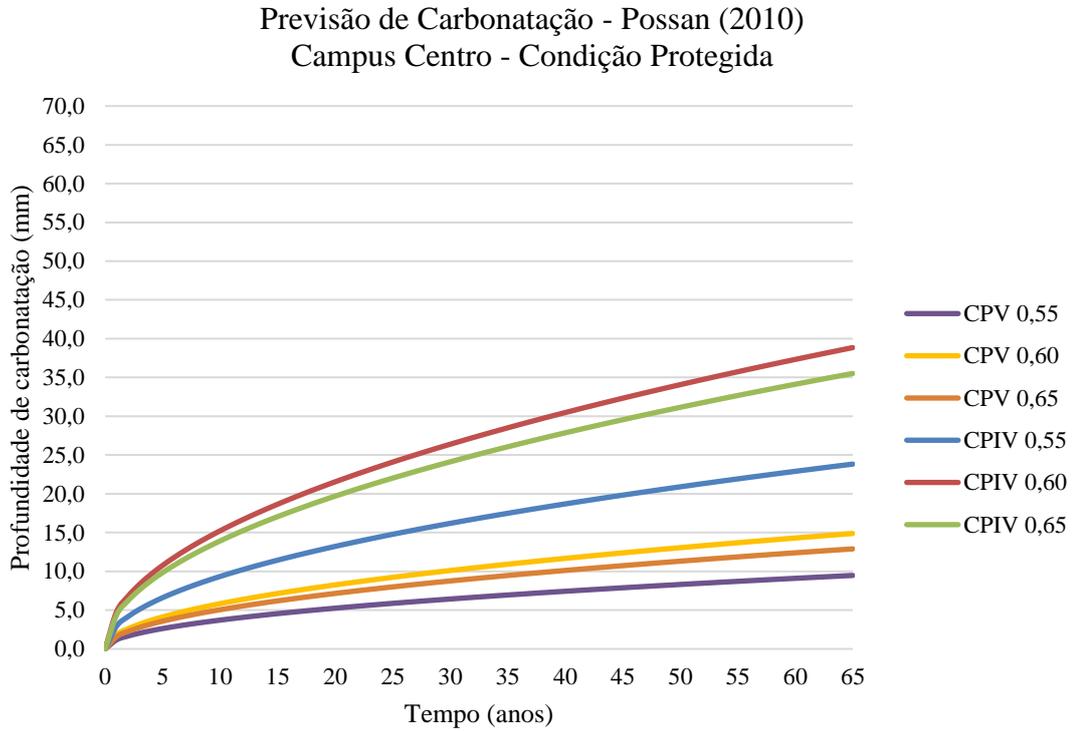
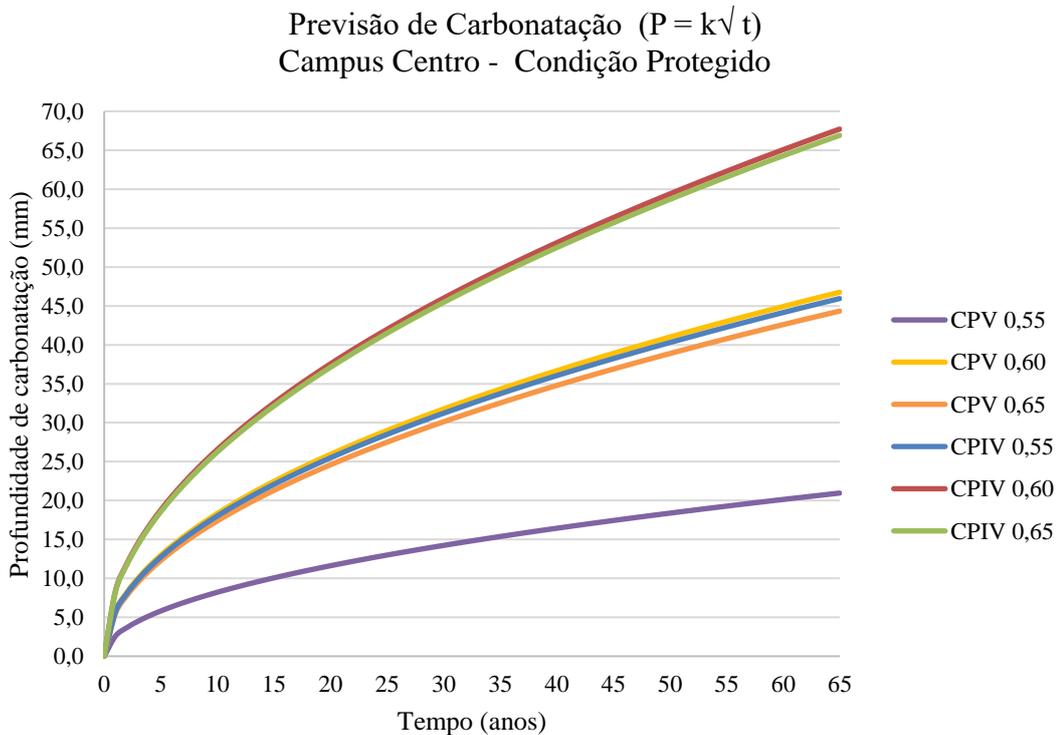


Figura 42 – Previsão da carbonatação calculada utilizando a equação simplificada para o Campus Centro condição protegida da chuva



A partir das Figuras 41 e 42 é possível concluir que o modelo proposto por Possan (2010) resulta em valores significativamente menores para o avanço da frente de carbonatação quando comparado com aqueles calculados pela equação simplificada. Através das Figuras 41 e 42 também é possível constatar que tanto o Modelo de Possan (2010) quanto a equação simplificada geram resultados coerentes com as constatações das análises estatísticas do Capítulo 6. As curvas que representam a carbonatação para as relações água/cimento 0,60 e 0,65 são mais próximas para os dois tipos de cimento quando comparada a curva para a relação água/cimento 0,55 (tanto para o cimento CPIV, quanto para o CPV). Visto que não é possível diferenciar os resultados obtidos para as amostras com relação água/cimento 0,60 e 0,65 (para um nível de confiança de 95%).

A seguir estão apresentados os dados obtidos para a outra condição de exposição no Campus Centro: desprotegida da chuva, calculados pelo Modelo proposto por Possan (2010) e pela equação simplificada ilustrados, respectivamente, pelas Figuras 43 e 44.

Figura 43 – Previsão da carbonatação calculada utilizando o modelo proposto por Possan (2010) para o Campus Centro condição desprotegida da chuva

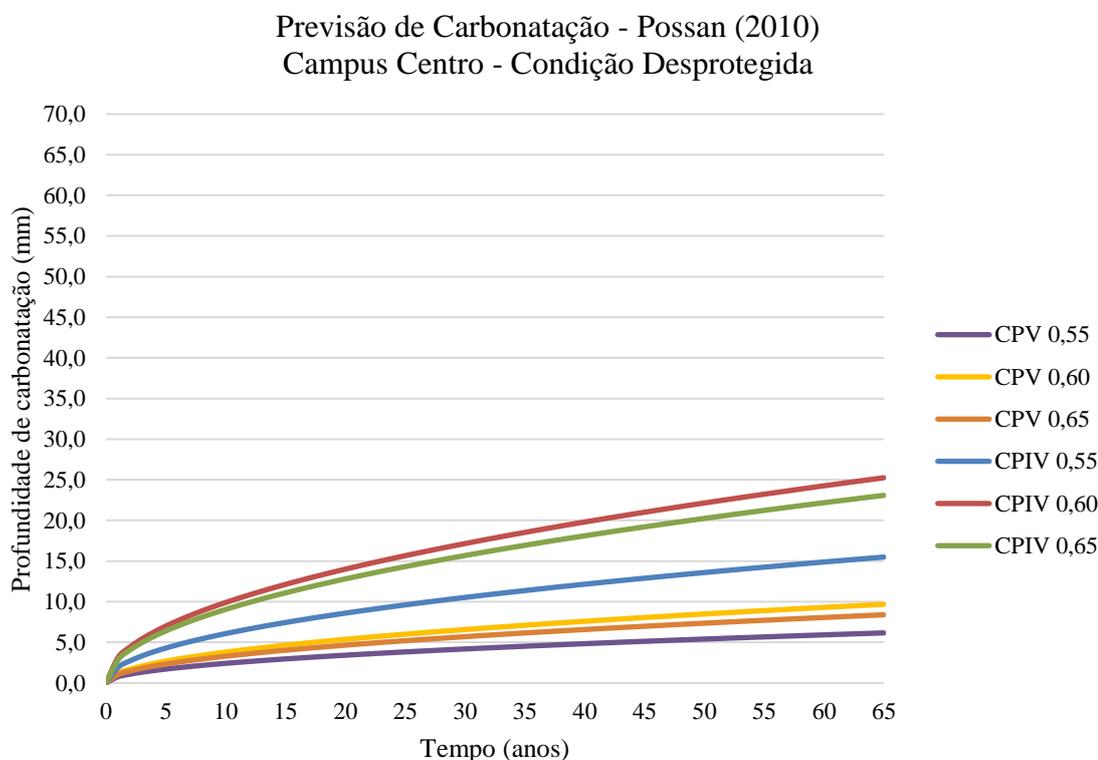
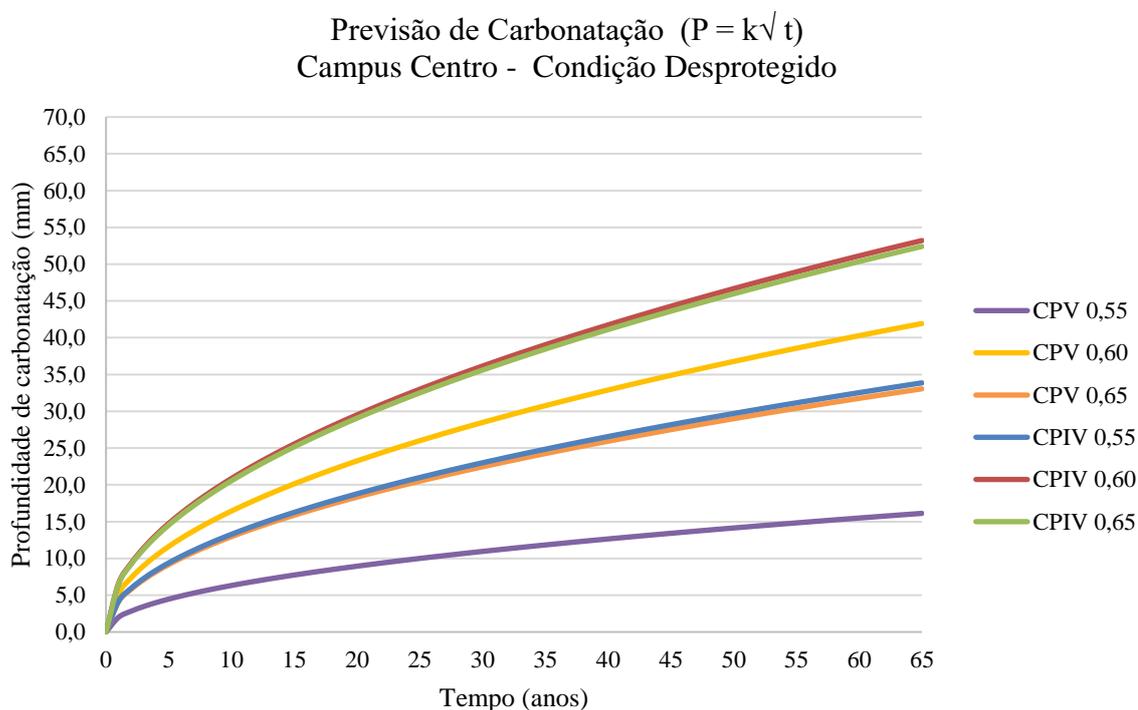


Figura 44 – Previsão da carbonatação calculada utilizando a equação simplificada para o Campus Centro condição desprotegida da chuva



Nas Figuras 43 e 44 é possível perceber um comportamento semelhante àquele observado para o Campus Centro protegido da chuva. Os valores calculados pelo Modelo de Possan (2010) são inferiores àqueles obtidos pela equação simplificada e ambos os métodos representam a questão da semelhança entre as condições relação água/cimento 0,60 e 0,65.

Quanto à influência da condição de exposição (protegido e desprotegido da chuva), ambos os métodos de cálculo estão de acordo com a literatura: a carbonatação é maior em elementos de concreto que não estão expostos à chuva. O modelo de Possan (2010) tem a seguinte premissa em relação à condição de exposição: a autora utiliza o ambiente externo protegido como o de referência para calcular a carbonatação, quando a estrutura está em um ambiente externo desprotegido da chuva a profundidade de carbonatação é minorada por coeficiente de valor 0,65. Pela equação simplificada a condição descoberta resultou em profundidades de carbonatação em média 30% menores que a condição coberta para o cimento CPV e aproximadamente 40% menores para o cimento CPIV.

A seguir estão apresentados os resultados obtidos para o outro local pesquisado: o Campus do Vale. Primeiramente são apresentados os dados para a condição protegida da chuva, calculados

peelo Modelo proposto por Possan (2010) e pela equação simplificada ilustrados respectivamente pelas Figuras 45 e 46.

Figura 45 – Previsão da carbonatação calculada utilizando o modelo proposto por Possan (2010) para o Campus do Vale condição protegida da chuva

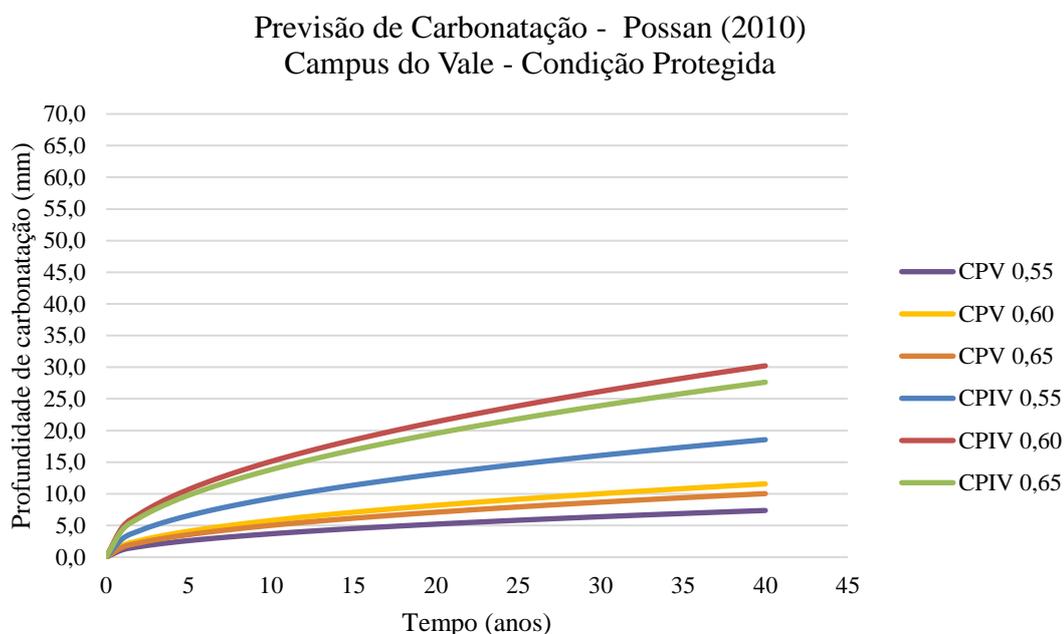
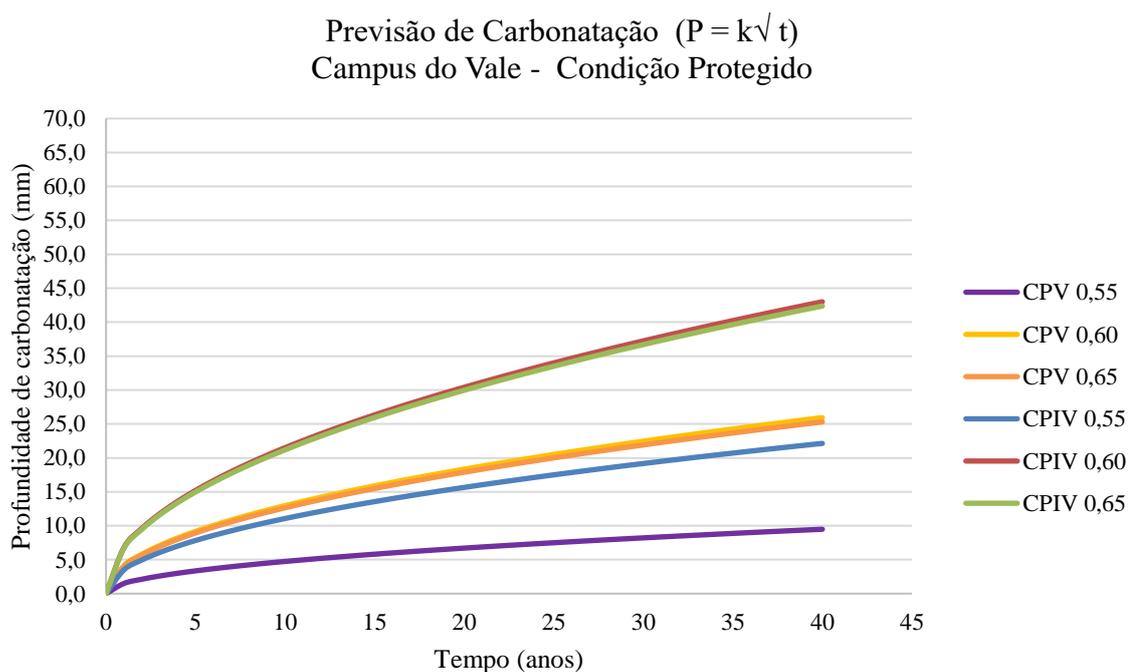


Figura 46 – Previsão da carbonatação calculada utilizando a equação simplificada para o Campus do Vale condição protegida da chuva



A partir das Figuras 45 e 46 é possível inferir que as diferenças entre os valores calculados pelo Modelo de Possan (2010) e pela equação simplificada é menor para o Campus do Vale quando comparado com as diferenças de resultados no Campus Centro para a mesma condição (protegido da chuva). Também podemos observar que a equação simplificada gerou maiores diferenças nos resultados dos dois ambientes estudados. Se compararmos as Figuras 45 e 46 com as Figuras 41 e 42 podemos perceber que a frente de carbonatação calculada pelo Modelo de Possan (2010) aumenta até 10 mm comparando a condição coberta no Campus Centro com o Campus do Vale, enquanto a mesma comparação para os valores calculados pela equação simplificada resulta em diferenças superiores à 20 mm.

A seguir estão apresentados os dados obtidos para a última condição estudada: desprotegida da chuva no Campus do Vale, calculados pelo Modelo proposto por Possan (2010) e pela equação simplificada ilustrados respectivamente pelas Figuras 47 e 48.

Figura 47 – Previsão da carbonatação calculada utilizando o modelo proposto por Possan (2010) para o Campus do Vale condição desprotegida da chuva

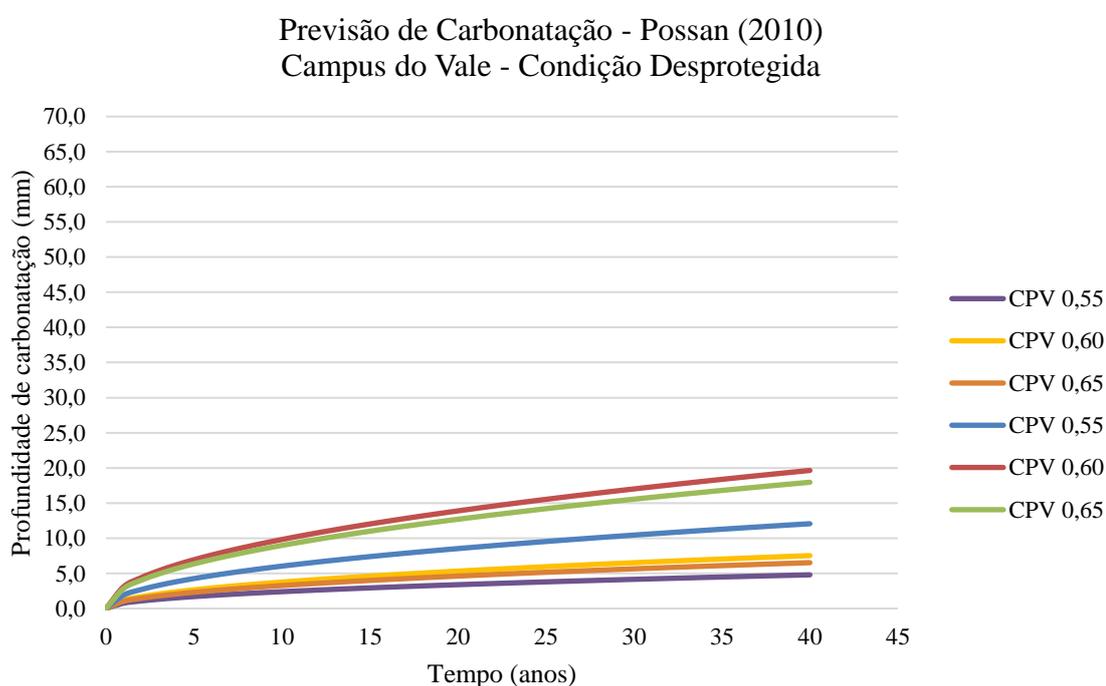
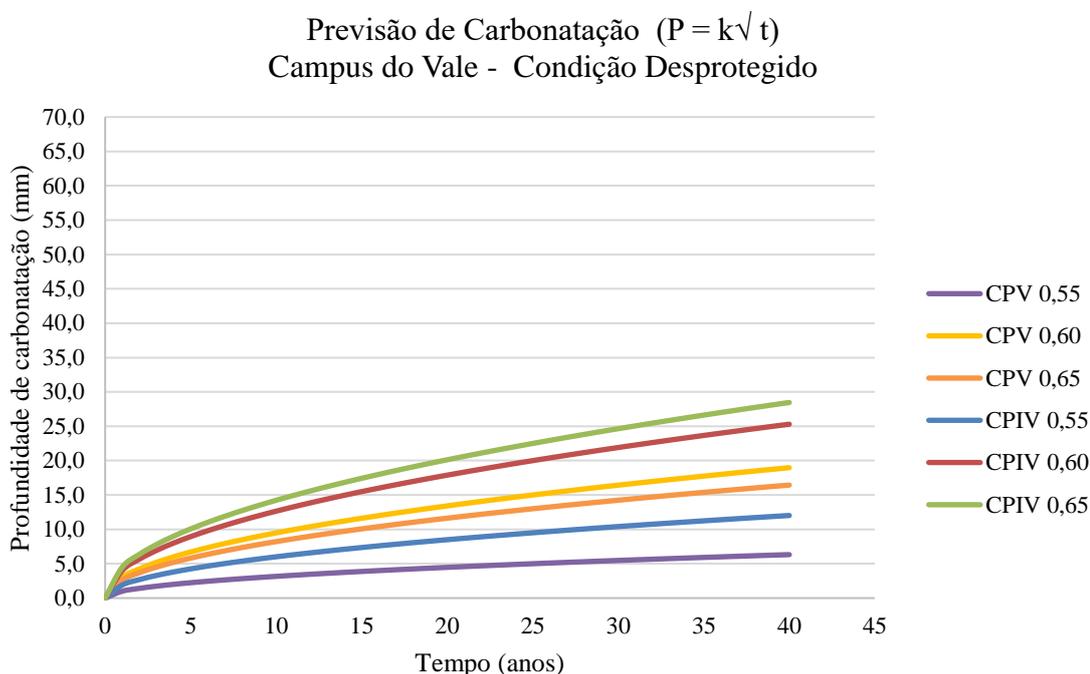


Figura 48 – Previsão da carbonatação calculada utilizando a equação simplificada para o Campus do Vale condição desprotegida da chuva



As Figuras 47 e 48 permitem conclusões semelhantes aquelas apresentadas anteriormente para as outras condições estudadas. As diferenças entre os valores cobertos e descobertos calculados pela equação simplificada ficaram mais próximas aquela proporção de 0,65 adotada no Modelo de Possan (2010) para os resultados do Campus do Vale. Para este segundo local de exposição a relação entre a carbonatação das amostras cobertas e descobertas variou de 0,65 à 0,73 para o cimento CPV e de 0,54 a 0,67 para o cimento CPIV.

Outra observação importante refere-se ao comportamento das condições relação água/cimento 0,60 e 0,65. Assim como nas outras condições estudadas a equação simplificada gerou resultados semelhantes para estas condições para os dois tipos de cimento. Utilizando a equação simplificada, a condição Campus do Vale desprotegido (Figura 48) foi a que os coeficientes destes dois tipos de cimento foram menos próximos numericamente, como é possível observar pelo afastamento das curvas nos gráficos.

De maneira geral pode-se concluir que o Modelo de Possan (2010) e a equação simplificada geram cenários diferentes para o avanço da frente de carbonatação. A equação simplificada apresenta uma frente de carbonatação mais veloz em todos os casos estudados, e diferencia mais os resultados nos dois ambientes de exposição (Campus Centro e Campus do Vale).

Realizadas as previsões do avanço da frente de carbonatação com os dois métodos propostos, foi feita a comparação destas previsões com os dados obtidos experimentalmente para a profundidade de carbonatação das estruturas existentes. Como os elementos de concreto ensaiados no Campus do Centro não apresentaram profundidades de carbonatação significativas para o fim desta pesquisa, esta etapa comparativa foi realizada apenas com o prédio do Centro de Biotecnologia localizado no Campus do Vale.

Optou-se por adotar um intervalo de confiança para a profundidade de carbonatação das amostras estudadas. Lembrando que devido à natureza destrutiva do ensaio foram coletados dados de profundidade de carbonatação de apenas seis pontos, três pontos de um pilar coberto e três pontos de um pilar descoberto exposto à chuva. Estes resultados foram apresentados na Tabela 25. Devido ao fato de três valores ser considerada uma amostra muito pequena e a variância é desconhecida utilizou-se a distribuição t de Student para o cálculo do intervalo de confiança. A distribuição t tem aparência similar à da distribuição normal padrão. Ambas são distribuições simétricas e unimodais, a diferença encontra-se nas caudas, a distribuição t tem caudas mais espessas e, conseqüentemente, mais probabilidade nas extremidades. Maiores informações sobre a distribuição t de Student podem ser encontrados em Montgomery e Runger (2012). O Intervalo de confiança foi calculado para as duas condições de exposição (coberto e descoberto) com base na média e no desvio padrão. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 28 e são válidos para um nível de confiança de 95%.

Tabela 28 – Intervalo de confiança para os valores de profundidade de carbonatação dos pilares do Centro de Biotecnologia

Local	Condição de exposição	Profundidade de carbonatação (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão	Intervalo de confiança	
					Inferior	Superior
Vale	Descoberto	9,70	9,43	0,231	8,86	10,01
		9,30				
		9,30				
	Coberto	15,40	14,77	0,603	13,27	16,26
		14,20				
		14,70				

Após o cálculo da previsão de carbonatação para a idade semelhante à das estruturas e dos intervalos de confiança para os dados das estruturas existentes foi possível realizar o comparativo entre estes. Lembrando que o objetivo desta análise é verificar a possibilidade de comparar dados de carbonatação de um elemento de concreto para definir características (tipo de cimento e relação água/cimento) de uma estrutura. No caso do presente trabalho os elementos analisados são dois pilares do Centro de Biotecnologia no Campus do Vale, um deles protegido da chuva e o outro exposto a chuva.

Para este tipo de análise é necessário determinar uma idade (ou tempo de exposição) para os pilares analisados. Como apresentado no Capítulo 4, estima-se que o Bloco IV (setor do Prédio do Centro de Biotecnologia) foi construído entre 1982 e 1988. Isto representa que os pilares apresentam uma idade estimada de 31 até 37 anos. Desta forma, foram feitos os comparativos para este intervalo de tempo. O resultado obtido nesta última análise está ilustrado nas Figuras 49 e 50 para o comparativo utilizando o modelo de Possan (2010), e nas Figuras 51 e 52 os resultados oriundos da análise com a equação simplificada.

Figura 49 – Comparação entre a carbonatação do pilar protegido da chuva do Centro de Biotecnologia e os dados de carbonatação calculados por Possan (2010)

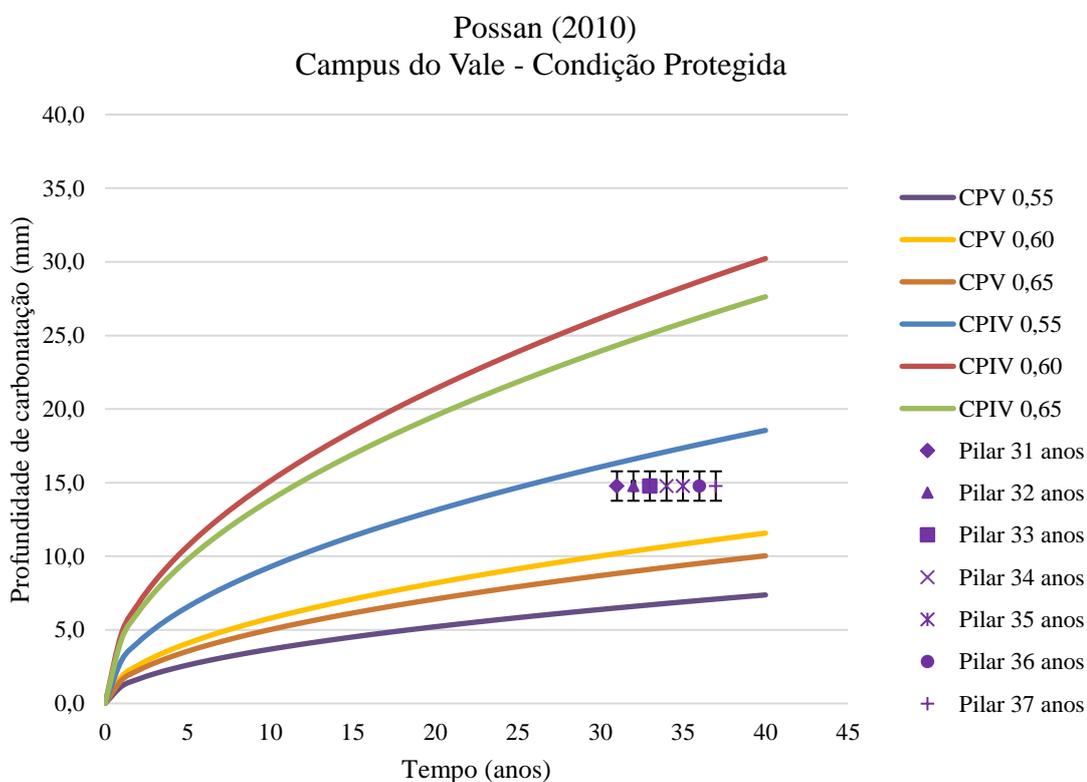
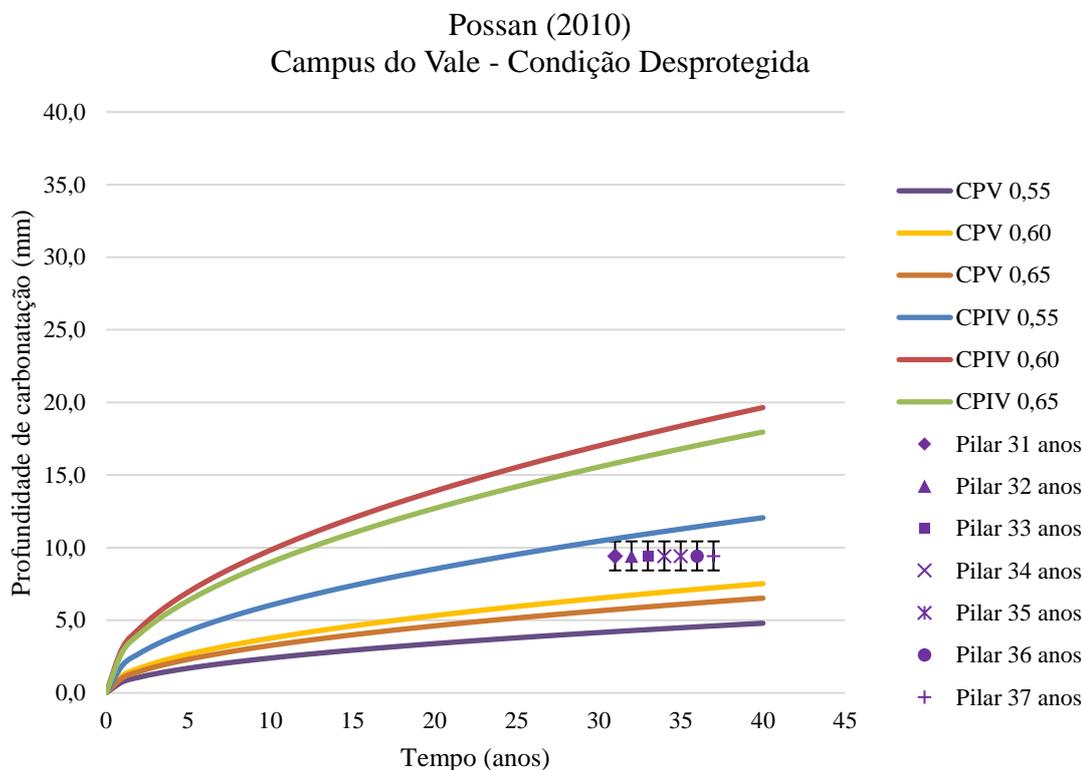


Figura 50 – Comparação entre a carbonatação do pilar exposto à chuva do Centro de Biotecnologia e os dados de carbonatação calculados por Possan (2010)



Através das análises das Figuras 49 e 50 é possível observar que a curva prevista pelo modelo de Possan (2010) que mais se assemelha ao comportamento dos pilares (coberto e descoberto) quanto a carbonatação é aquela que representa as condições cimento CPIV e relação água/cimento 0,55. Entretanto, conforme aumenta a idade estimada do elemento, o ponto que representa a carbonatação do pilar distancia-se desta curva.

Outra observação é que mesmo para o cenário do pilar com 31 anos para as duas condições analisadas (Figuras 49 e 50), a curva mais próxima (Cimento CPIV e $a/c = 0,55$) não atravessa do intervalo de confiança calculado para a carbonatação do pilar. O que significa que para um nível de confiança de 95% não é possível afirmar que existe a possibilidade destas características serem semelhantes às do pilar.

Por outro lado, se para o cálculo for considerada a margem de erro de 0,5 mm adotada pela RILEM CPC-18 (1988), a curva atravessaria o intervalo de confiança em duas condições para o pilar coberto: para as idades 31 e 32 anos. Para o pilar descoberto, mesmo levando em consideração a margem 0,5mm, a curva não atravessa o intervalo de confiança. O que significa que para um nível de confiança de 95%, caso a idade do pilar protegido da chuva seja de 31 ou

32 anos é possível que este tenha características semelhantes ao tipo de cimento CPIV e relação água/cimento 0,55.

Após a realização das análises utilizando o modelo proposto por Possan (2010) foi executado o mesmo procedimento, desta vez, utilizando as curvas calculadas pela equação simplificada. Os resultados desta análise estão apresentados nas Figuras 51 e 52.

Figura 51 – Comparação entre a carbonatação do pilar protegido da chuva do Centro de Biotecnologia e os dados de carbonatação calculados pela equação simplificada

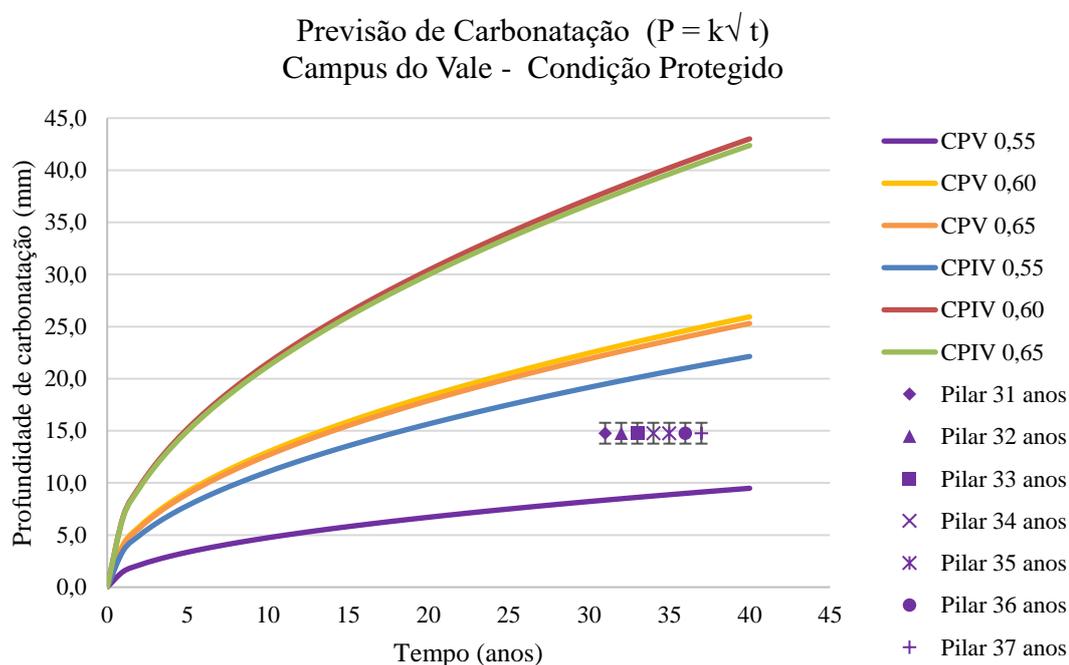
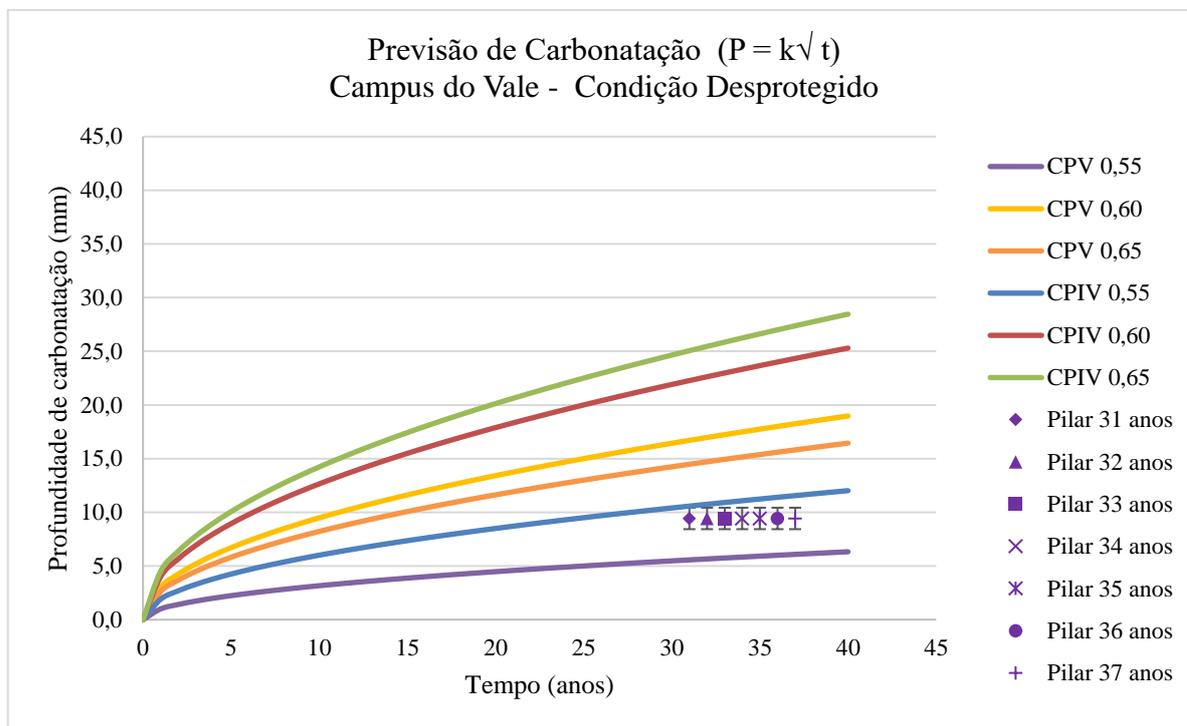


Figura 52 – Comparação entre a carbonatação do pilar desprotegido da chuva do Centro de Biotecnologia e os dados de carbonatação calculados pela equação simplificada



As Figuras 51 e 52 permitem conclusões distintas daquelas obtidas para a análise utilizando as curvas traçadas pelo modelo de Possan (2010). Para o pilar protegido (Figura 51) o intervalo de confiança encontra-se entre as curvas de avanço da frente de carbonatação que representam o cimento CPIV com $a/c = 0,55$ e o cimento CPV com a mesma relação água/cimento. Entretanto, essas curvas não cruzam o intervalo em nenhuma das idades estimadas, nem se forem considerados o intervalo de confiança de 0,5 mm adotado pela RILEM CPC-18 (1988). Este resultado se repete para o pilar descoberto, a curva mais próxima (cimento CPIV e $a/c = 0,55$) também não atravessa o intervalo de confiança nem se considerarmos a margem de 0,5 mm.

Relembrando que a pesquisa apresenta limitações e todas as conclusões oriundas desta análise final tratam de possibilidades. Existem outros fatores que influenciam na carbonatação que não foram analisados, como por exemplo quando se optou por adotar um único traço visando limitar a quantidade de amostras. Uma análise com diferentes traços poderia resultar em outras conclusões, visto que a quantidade de cimento influencia no processo de carbonatação. Assim como a utilização de outros valores para a relação água/cimento e a aplicação de outros tipos de cimento poderiam deixar a pesquisa mais abrangente e completa.

Outro comentário pertinente está relacionado com a natureza da carbonatação. Este mecanismo de degradação é altamente influenciado por condições ambientais, e por mais que atualmente existam ferramentas com capacidade de medir estas grandezas, ainda são variáveis incontroláveis e às vezes a adoção de valores médios, permite a simplificação das análises, mas pode mascarar a realidade.

Concluída esta análise final o próximo capítulo apresenta as considerações finais do trabalho onde são discutidas as principais conclusões da pesquisa e apontadas sugestões para futuros trabalhos que queiram dar continuidade a pesquisas em carbonatação e vida útil.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa se propôs a verificar a possibilidade de utilizar um ensaio de medição de profundidade de carbonatação para estimar características de uma estrutura, ou elementos estruturais já prontos. Trabalhou-se experimentalmente com duas características, tipo de cimento e relação água/cimento. Para isto foram obtidos dados de carbonatação natural e a adoção de dois métodos distintos para prever o avanço da frente de carbonatação. Considerando que se trata de um ensaio simples e de baixo custo financeiro seria uma ótima ferramenta para auxiliar na tomada de decisão em ações de reparo e manutenção de estruturas.

Durante a realização da pesquisa, principalmente na parte experimental, verificou-se as dificuldades de trabalhar com um fenômeno que envolve diversos fatores altamente variáveis como a carbonatação. A utilização de métodos estatísticos para a compreensão do fenômeno e análise de resultados mostrou-se uma importante ferramenta.

A revisão bibliográfica indicou que existe um forte consenso sobre os fatores que influenciam no processo de carbonatação e como este fenômeno atua nos elementos de concreto armado. Entretanto, realizando a pesquisa foi possível concluir que o método de ensaio utilizando um indicador de pH ainda não é muito preciso, resultando em muito ruído experimental, que dificulta análises mais sólidas. A ausência de um modelo consolidado para a previsão do avanço da frente carbonatação também se demonstrou um fator que dificultou o estudo proposto.

O período de exposição das amostras demonstrou-se realmente pequeno como o esperado para um fenômeno tão lento. Foram realizadas análises estatísticas para verificar a influência dos fatores controláveis da pesquisa e a interação entre estes. Analisando os resultados obtidos nos ensaios para a resistência à compressão, concluiu-se que para um nível de confiança de 95% não é possível diferenciar estatisticamente as amostras com relação água/cimento 0,60 e 0,65. Esta impossibilidade de diferenciar estas amostras apareceu novamente quando foi realizada a mesma análise para os dados experimentais de profundidade de carbonatação. Nesta última análise, também foi possível concluir que os fatores que mais influenciaram no avanço da frente de carbonatação nas amostras foram as características do concreto (relação água/cimento e tipo de cimento) seguido das condições ambientais (condição de exposição e local de exposição).

Outra observação é que a interação entre condição de exposição e tipo de cimento se mostrou significativa nos resultados de carbonatação.

Entretanto, devido ao curto período de exposição e a alta influência do erro (também verificada através da análise de variância dos dados de carbonatação) na parte experimental da pesquisa, estes resultados não devem ser utilizados para conclusões mais amplas sobre o comportamento de estruturas de concreto, representando apenas o comportamento das amostras preparadas para a pesquisa.

A análise utilizando dois métodos distintos para a previsão de carbonatação (um deles um modelo determinístico proposto por Possan (2010) e o outro uma análise mais simples derivada da lei de Fick) resultou em dois resultados distintos no final. Utilizando o modelo concluiu-se que o concreto que mais se assemelha aos elementos estruturais estudados é um concreto com cimento CPIV e relação água/cimento 0,55 (conclusão válida apenas para o tempo de exposição de 31 e 32 anos) para a condição protegido. Na condição elemento desprotegido da chuva não é possível concluir que o pilar se é semelhante ao mesmo a nenhuma das condições estudadas. Para a análise baseada na equação simplificada, também não é possível concluir que as características dos pilares são semelhantes a nenhuma das condições estudadas. Relembrando que estes resultados são válidos para um nível de confiança de 95%.

Este fato demonstra que é necessário um modelo de previsão consolidado para que o objetivo de estimar características de uma estrutura com o ensaio de carbonatação seja atingido. Infelizmente a falta de informações sobre as estruturas analisadas não permite verificar se os resultados obtidos na análise final são semelhantes à realidade e qual dos métodos é considerado mais adequado para este tipo de análise. Entretanto, acredita-se que é um método válido para estimar características do concreto. Contudo, é necessário, além de um modelo consolidado, ampliar as condições estudadas em trabalhos futuros, lembrando que a parte experimental do presente trabalho consistiu em apenas duas variáveis controláveis.

Embora exista esta impossibilidade de concluir se a análise final realmente resultou nas características dos elementos analisados, o trabalho aparenta ser um começo válido para a ideia de no futuro utilizar ensaios simples para estimar características de estruturas já existentes. Esta ferramenta possibilitaria ampliar o conhecimento sobre a vida útil de estruturas de estruturas de concreto armado e auxiliar em processos de manutenção.

Desta maneira sugere-se que para futuros trabalhos o método apresentado nesta pesquisa seja reproduzido com a introdução de novas variáveis como a utilização de outros tipos de cimento, novos valores para a relação água/cimento e a aplicação de outros traços para o concreto. Outra sugestão é a utilização de outros métodos para a análise final além do modelo de Possan (2010) e da equação simplificada baseada na lei de Fick, como por exemplo outros modelos disponíveis pela literatura.

Outra análise que poderia ser feita visando investigar se realmente é possível utilizar ensaios de medição de profundidade de carbonatação para estimar características do concreto, é realizar o mesmo estudo apresentado nesta pesquisa em uma estrutura cujas características estão documentadas. Isto permitirá concluir se a análise final realmente representa a realidade, validando o método.

Outra sugestão, tendo em vista que a carbonatação não é o único fenômeno de degradação de uma estrutura, e em alguns ambientes este fenômeno não acontece (lugares com umidade extremas) seria interessante em pesquisas futuras, adotar um método semelhante ao utilizado nesta pesquisa para outros mecanismos de degradação. Ou analisar em uma mesma pesquisa a interação entre diferentes fatores de degradação.

Além destes, outros estudos podem ser realizados que contribuiriam para o método apresentado nesta pesquisa, como por exemplo, estudos que visem consolidar um modelo determinístico de previsão de carbonatação. Ou, até mesmo pesquisas para tornar mais preciso o método de medição da profundidade de carbonatação.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A. G. **Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante**. 2004. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- AGOPYAN, V. A engenharia não é uma ciência exata. **Folha de São Paulo**, São Paulo. Fev, 2019 Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/opiniaio/2019/02/a-engenharia-nao-e-uma-ciencia-exata.shtml>>. Acesso em: 18 set. 2019.
- AHMAD, S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction – a review. **Cement & Concrete Composites**, n.25, p 459-471, 2003.
- AL-KHAYAT, H.; HAQUE, M. N.; FATTUHI, N. I. Concrete carbonation in arid climate. **Materials and Structures**. v, 35, p. 421-426, Aug. 2002
- ANDRADE, C. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2. ed. São Paulo. Pini, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: edificações habitacionais – desempenho parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Julho, 2003.
- _____. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. In: OLLIVEIR, J.; VICHOT, A. (Ed). **Durabilidade do concreto**: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2014. p. 255-326.

CAVALCANTI, R.S. **Ensaio de ondas ultrassônicas e redes neurais artificiais na avaliação da resistência à compressão do concreto**. Recife, 2010. 231p. Dissertação (Mestrado)– Universidade Católica de Pernambuco.

CASTRO, P.; SANJUAN, M. A.; GENESCÁ, J. Carbonation of concrete in the Mexican Gulf. **Building and Environment**, n.35, p 145-149, Jan. 1999.

CHEN, C.; HO, C. Influence of Cyclic Humidity on Carbonation of Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, p. 1929-1935, Dec. 2013.

DUTRA, F. **CPD promove feira de serviços no Campus do Vale**. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/ufrgs/noticias/cpd-promove-feira-de-servicos-no-campus-do-vale> Acesso em 22 outubro, 2018.

ESPÍNDULA, S. S. **Implantação Física da UFRGS: da Fundação ao Campus do Vale**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 1979.

EKOLU, S. O. Model for practical prediction of natural carbonation in reinforced concrete: Part 1 – formulation. **Cement and Concrete Composites**, n.86, p.40-56, Oct. 2018.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013.197p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2013.

FIGUEIREDO, E. P. **Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto**. In ISAIA, G. C. Ed. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Volume 2. 1. ed. São Paulo, 2005. p. 829-855.

GALAN I.; ANDRADE, C.; MORA, P.; SANJUAN, M. A. Sequestration of CO₂ by Concrete Carbonation. **Environ. Sci. Technol.** n. 44, p. 3181-3186. Mar, 2010.

HELENE, P. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armadura de Concreto Armado**. São Paulo, 1993. 231p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo.

HOOTON, R. D.; BICKLEY, J. A. Design for durability: The key to improving concrete sustainability. **Construction and Building Materials**, n.67, p 422-430, Jan. 2014.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Brasil. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>> Acesso em: 19 set. 2019.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Genebra, Suíça: Gian-Kasper Plattner, 2014. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch.>> Acesso em: 19 jan. 2020.

KAZMIERCZAC, C. S. **Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

KHUNTHONGKEAW, J.; TANGTERMSIRIKUL, S.; LEELAWAT, T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. **Construction and Building Materials**, n.20, p 744-753, Jan. 2006.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao Estudo de Carbonatação em Concretos e argamassas compostos com Adição de Sílica Ativa**. 2002. 178p. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

MANO, C.M. **Orientação espacial em desenho urbano tradicional e modernista: estudo em campi universitários da UFRGS**. Porto Alegre, 2016. 221f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Programa de Pós-graduação em Planejamento Urbano e Regional, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MATHER, B. Concrete durability. **Cement & Concrete Composites**, n.26, p 3-4, 2004.

MEDEIROS, H. F. M.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto**. In ISAIA, G. C. Ed. **Concreto: ciência e tecnologia**. Volume 1. 1. ed. São Paulo, 2011. p. 773-808.

METHA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: PINI, 2014. 573p

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5. ed. Rio de Janeiro. LTC, 2012.

MÜLLER, H. S.; HAIST M.; VOGEL, M. Assessment of the sustainability potencial of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime. **Construction and Building Materials**, n.67, p 321-337, Feb. 2014.

NEVILLE, A., BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre, Bookman, 2013.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation. **AIChE Journal**. V. 35, n 10, p. 1639-1650, 1989.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. 2004.176f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 2009. 285 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. **Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil**. *Ambiente construído*, v. 7, n. 4, p. 7-20, 2007.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010.263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX.
CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth. (RILEM
Recomemendations CPC-18). Materials and Structures, [s.n.]. 1988. p. 453-455.

SANJUÁN, M. A.; ANDRADE, C.; CHEYREZY, M. Concrete carbonation tests in natural
an accelerated conditions. **Advances in Cement Research**, n.4, p 171-180, Oct. 2003.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da
permeação de água e da adição de microssílica.** 1994. 143p. Dissertação (Mestrado em
Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SIMON, G. **Campus Central UFRGS.** Disponível em:
<https://portoimagem.wordpress.com/2011/11/18/ufrgs-e-a-segunda-universidade-federal-com-nota-maxima-no-indice-geral-de-cursos/campus-central-ufrgs-gilberto-simon/> Acesso em 22
outubro, 2018.

TA, V.; BONNET, S., KIESSE, T.S.; VENTURA, A. A new meta-model to calculate
carbonation front depth within concrete structures. **Construction and Building Materials**,
n.129, p 172-181, Oct. 2016.

TONIOLI, R. M. **Cidade de universidade: arquitetura e configuração urbana do Campus
Centro da UFRGS.** 2014. 238 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Programa de
Pesquisa Pós-graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto
Alegre, 2014.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete.** Stockholm, 1982. 469p. Tese (Doutorado) –
Swedish Cement and Concrete Research Institute.

**APÊNDICE A - Dados de profundidade de carbonatação das amostras de
laboratório**

t = 0									
Tipo de Cimento	A/C	CP	Local	Condição	p1 (mm)	p2 (mm)	p3 (mm)	p4 (mm)	pm (mm)
CPV	0,55	1A	Centro	Coberto	0,0	0,0	0,8	0,9	0,4
		1B	Centro	Coberto	0,0	0,0	0,7	0,4	0,3
		1C	Centro	Descoberto	0,0	0,0	0,3	0,5	0,2
		1D	Centro	Descoberto	0,0	0,0	0,2	0,2	0,1
		1E	Vale	Coberto	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
		1F	Vale	Coberto	0,0	0,0	0,5	0,0	0,1
		1G	Vale	Descoberto	0,5	0,0	0,0	0,0	0,1
		1H	Vale	Descoberto	0,0	0,5	1,0	0,0	0,4
	0,60	2A	Centro	Coberto	1,7	1,0	0,0	0,5	0,8
		2B	Centro	Coberto	1,7	1,7	1,0	1,2	1,4
		2C	Centro	Descoberto	1,1	0,0	0,9	1,0	0,8
		2D	Centro	Descoberto	1,5	1,0	0,0	0,8	0,8
		2E	Vale	Coberto	1,5	0,9	0,0	0,5	0,7
		2F	Vale	Coberto	0,4	0,4	1,0	0,0	0,5
		2G	Vale	Descoberto	1,9	1,3	0,8	0,0	1,0
		2H	Vale	Descoberto	0,8	1,0	0,7	0,3	0,7
	0,65	3A	Centro	Coberto	1,3	1,4	1,1	1,6	1,4
		3B	Centro	Coberto	1,8	1,0	1,0	2,0	1,5
		3C	Centro	Descoberto	1,1	0,9	0,5	1,9	1,1
		3D	Centro	Descoberto	1,8	1,0	1,4	1,4	1,4
		3E	Vale	Coberto	0,6	0,7	0,0	0,0	0,3
		3F	Vale	Coberto	0,0	1,1	1,0	1,1	0,8
		3G	Vale	Descoberto	2,0	0,0	1,0	0,0	0,8
		3H	Vale	Descoberto	1,3	1,2	1,7	1,0	1,3
CPIV	0,55	4A	Centro	Coberto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		4B	Centro	Coberto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		4C	Centro	Descoberto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		4D	Centro	Descoberto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		4E	Vale	Coberto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		4F	Vale	Coberto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		4G	Vale	Descoberto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		4H	Vale	Descoberto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,60	5A	Centro	Coberto	1,0	1,0	0,8	0,5	0,8
		5B	Centro	Coberto	0,5	0,5	1,0	1,0	0,8
		5C	Centro	Descoberto	0,7	1,1	0,0	1,1	0,7
		5D	Centro	Descoberto	1,3	0,9	1,6	0,8	1,2
		5E	Vale	Coberto	0,7	1,0	0,8	1,7	1,1
		5F	Vale	Coberto	0,8	0,5	1,2	0,8	0,8
		5G	Vale	Descoberto	1,1	0,5	1,1	0,0	0,7
		5H	Vale	Descoberto	0,5	0,2	0,4	0,7	0,5
	0,65	6A	Centro	Coberto	1,5	1,4	1,0	0,9	1,2
		6B	Centro	Coberto	1,6	1,3	1,0	0,4	1,1
		6C	Centro	Descoberto	0,9	0,3	0,6	1,1	0,7
		6D	Centro	Descoberto	1,5	1,3	0,0	1,0	1,0
		6E	Vale	Coberto	0,0	1,1	1,4	1,3	1,0
		6F	Vale	Coberto	1,4	0,0	1,5	1,0	1,0
		6G	Vale	Descoberto	0,4	0,5	0,6	0,1	0,4
		6H	Vale	Descoberto	1,5	1,5	1,0	0,0	1,0

t = 28 dias									
Tipo de Cimento	A/C	CP	Local	Condição	p1 (mm)	p2 (mm)	p3 (mm)	p4 (mm)	pm (mm)
CPV	0,55	1A	Centro	Coberto	0,0	0,0	0,8	0,9	0,4
		1B	Centro	Coberto	0,0	0,0	0,7	0,4	0,3
		1C	Centro	Descoberto	0,0	0,0	0,7	0,5	0,3
		1D	Centro	Descoberto	0,0	0,0	0,2	0,6	0,2
		1E	Vale	Coberto	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1
		1F	Vale	Coberto	0,0	0,5	0,0	0,0	0,1
		1G	Vale	Descoberto	0,0	0,5	0,0	0,0	0,1
		1H	Vale	Descoberto	0,0	0,0	0,5	1,0	0,4
	0,60	2A	Centro	Coberto	1,7	1,0	0,0	0,5	0,8
		2B	Centro	Coberto	1,7	2,0	1,4	1,3	1,6
		2C	Centro	Descoberto	1,8	0,0	1,1	1,8	1,2
		2D	Centro	Descoberto	1,5	1,3	0,0	1,0	1,0
		2E	Vale	Coberto	1,5	0,9	0,5	1,2	1,0
		2F	Vale	Coberto	1,0	0,7	0,6	1,0	0,8
		2G	Vale	Descoberto	1,9	1,3	1,0	0,0	1,1
		2H	Vale	Descoberto	0,8	1,0	0,7	0,3	0,7
	0,65	3A	Centro	Coberto	1,3	1,4	1,1	2,0	1,5
		3B	Centro	Coberto	1,8	1,0	1,0	2,0	1,5
		3C	Centro	Descoberto	1,1	0,9	0,7	1,9	1,2
		3D	Centro	Descoberto	2,0	1,0	1,5	1,4	1,5
		3E	Vale	Coberto	0,6	0,7	0,0	0,0	0,3
		3F	Vale	Coberto	1,1	1,0	0,0	1,0	0,8
		3G	Vale	Descoberto	2,0	0,0	1,0	0,0	0,8
		3H	Vale	Descoberto	2,0	1,0	1,2	1,0	1,3
CPIV	0,55	4A	Centro	Coberto	1,2	1,0	0,5	1,5	1,1
		4B	Centro	Coberto	1,7	1,1	0,0	0,5	0,8
		4C	Centro	Descoberto	1,0	1,0	0,5	0,0	0,6
		4D	Centro	Descoberto	0,0	0,6	0,0	0,0	0,2
		4E	Vale	Coberto	0,6	0,0	0,0	0,0	0,2
		4F	Vale	Coberto	0,6	0,7	0,0	0,7	0,5
		4G	Vale	Descoberto	0,8	0,0	0,0	0,7	0,4
		4H	Vale	Descoberto	0,5	0,0	0,0	0,0	0,1
	0,60	5A	Centro	Coberto	2,5	1,3	2,3	1,4	1,9
		5B	Centro	Coberto	1,5	2,2	1,1	1,1	1,5
		5C	Centro	Descoberto	2,0	2,0	1,4	0,9	1,6
		5D	Centro	Descoberto	2,0	1,0	2,0	0,8	1,5
		5E	Vale	Coberto	2,1	1,6	1,0	1,1	1,5
		5F	Vale	Coberto	1,7	1,4	1,4	1,0	1,4
		5G	Vale	Descoberto	1,1	0,5	1,1	0,0	0,7
		5H	Vale	Descoberto	0,7	0,2	0,4	0,7	0,5
	0,65	6A	Centro	Coberto	2,2	2,0	2,4	2,4	2,3
		6B	Centro	Coberto	1,7	2,0	1,4	2,3	1,9
		6C	Centro	Descoberto	0,9	0,3	0,6	1,1	0,7
		6D	Centro	Descoberto	1,5	1,3	0,0	1,0	1,0
		6E	Vale	Coberto	1,0	1,5	1,6	1,9	1,5
		6F	Vale	Coberto	1,6	2,0	1,3	1,4	1,6
		6G	Vale	Descoberto	0,4	0,6	0,6	0,1	0,4
		6H	Vale	Descoberto	1,5	1,5	1,0	0,0	1,0

t = 60 dias									
Tipo de Cimento	A/C	CP	Local	Condição	p1 (mm)	p2 (mm)	p3 (mm)	p4 (mm)	pm (mm)
CPV	0,55	1A	Centro	Coberto	1,8	1,2	0,9	0,6	1,1
		1B	Centro	Coberto	1,9	1,1	0,1	0,1	0,8
		1C	Centro	Descoberto	1,3	0,7	0,9	0,1	0,8
		1D	Centro	Descoberto	1,0	0,6	0,9	1,3	1,0
		1E	Vale	Coberto	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1
		1F	Vale	Coberto	0,0	0,0	0,0	0,5	0,1
		1G	Vale	Descoberto	0,5	0,1	0,1	0,0	0,2
		1H	Vale	Descoberto	1,0	0,5	0,2	0,1	0,5
	0,60	2A	Centro	Coberto	3,0	2,4	2,4	1,8	2,4
		2B	Centro	Coberto	2,8	2,4	2,6	2,5	2,6
		2C	Centro	Descoberto	2,4	2,7	2,7	1,7	2,4
		2D	Centro	Descoberto	2,2	2,0	2,5	1,1	2,0
		2E	Vale	Coberto	1,4	1,6	1,0	1,4	1,4
		2F	Vale	Coberto	1,5	2,1	1,9	1,5	1,8
		2G	Vale	Descoberto	1,4	2,3	1,6	1,0	1,6
		2H	Vale	Descoberto	1,4	1,0	1,0	1,0	1,1
	0,65	3A	Centro	Coberto	1,6	2,7	2,2	2,5	2,3
		3B	Centro	Coberto	2,1	2,1	2,3	1,4	2,0
		3C	Centro	Descoberto	2,1	2,3	2,0	2,0	2,1
		3D	Centro	Descoberto	2,0	1,6	1,9	2,7	2,1
		3E	Vale	Coberto	1,3	0,9	1,0	0,5	0,9
		3F	Vale	Coberto	1,3	1,2	1,5	1,3	1,3
		3G	Vale	Descoberto	0,7	1,3	1,4	0,6	1,0
		3H	Vale	Descoberto	1,1	0,8	1,4	2,0	1,3
CPIV	0,55	4A	Centro	Coberto	2,8	3,0	1,6	2,5	2,5
		4B	Centro	Coberto	2,7	2,4	1,4	2,1	2,2
		4C	Centro	Descoberto	2,1	2,1	1,3	1,5	1,8
		4D	Centro	Descoberto	1,2	1,0	2,5	2,1	1,7
		4E	Vale	Coberto	1,7	1,5	1,2	1,3	1,4
		4F	Vale	Coberto	0,5	1,1	0,2	0,4	0,6
		4G	Vale	Descoberto	0,4	0,6	0,0	0,5	0,4
		4H	Vale	Descoberto	0,0	0,5	0,5	0,7	0,4
	0,60	5A	Centro	Coberto	2,3	3,5	3,0	4,0	3,2
		5B	Centro	Coberto	2,7	2,9	3,6	2,5	2,9
		5C	Centro	Descoberto	3,0	3,2	3,0	2,5	2,9
		5D	Centro	Descoberto	2,5	3,0	2,2	3,0	2,7
		5E	Vale	Coberto	2,2	3,0	2,5	2,5	2,6
		5F	Vale	Coberto	2,3	2,4	3,5	2,2	2,6
		5G	Vale	Descoberto	2,0	1,7	1,5	1,7	1,7
		5H	Vale	Descoberto	0,6	0,7	0,6	1,0	0,7
	0,65	6A	Centro	Coberto	3,6	3,7	3,6	2,9	3,5
		6B	Centro	Coberto	3,4	3,5	3,2	3,5	3,4
		6C	Centro	Descoberto	2,8	2,4	3,1	3,0	2,8
		6D	Centro	Descoberto	2,6	2,1	2,4	3,1	2,6
		6E	Vale	Coberto	3,0	1,6	2,7	2,2	2,4
		6F	Vale	Coberto	2,5	2,7	1,5	2,2	2,2
		6G	Vale	Descoberto	1,0	0,8	0,6	0,0	0,6
		6H	Vale	Descoberto	1,1	2,0	0,9	1,6	1,4

t = 95 dias														
Tipo de Cimento	A/C	CP	Local	Condição	p1 (mm)	p2 (mm)	p3 (mm)	p4 (mm)	p5 (mm)	p6 (mm)	p7 (mm)	p8 (mm)	pm (mm)	
CPV	0,55	1A	Centro	Cob.	2,1	1,7	3,4	1,0	1,5	0,6	2,6	1,8	1,8	
		1B	Centro	Cob.	1,6	2,1	1,7	1,1	1,1	0,8	1,1	1,0	1,3	
		1C	Centro	Descob.	1,6	1,4	1,2	1,0	1,0	0,0	1,0	1,1	1,0	
		1D	Centro	Descob.	2,0	1,9	1,0	1,1	1,0	0,9	0,9	1,1	1,2	
		1E	Vale	Cob.	1,0	0,5	0,0	0,0	0,6	0,0	0,6	0,1	0,4	
		1F	Vale	Cob.	1,0	1,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	
		1G	Vale	Descob.	1,3	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	
		1H	Vale	Descob.	2,0	1,5	0,8	0,0	0,3	0,7	0,5	0,3	0,8	
	0,60	2A	Centro	Cob.	2,2	2,4	2,5	2,4	2,1	1,5	3,0	2,3	2,3	
		2B	Centro	Cob.	3,2	3,0	3,1	2,9	2,5	3,0	2,5	2,6	2,9	
		2C	Centro	Descob.	2,5	3,1	3,0	2,5	3,1	2,1	3,3	3,1	2,8	
		2D	Centro	Descob.	3,0	2,7	2,7	3,4	2,8	2,6	3,0	2,2	2,8	
		2E	Vale	Cob.	1,9	2,1	2,0	2,1	3,3	2,2	2,5	2,0	2,3	
		2F	Vale	Cob.	2,0	1,2	1,8	2,0	3,2	3,6	1,5	2,0	2,2	
		2G	Vale	Descob.	1,9	2,7	1,4	1,6	2,6	1,9	1,2	1,7	1,9	
		2H	Vale	Descob.	1,5	1,6	0,9	1,0	0,8	0,0	2,2	2,2	1,3	
	0,65	3A	Centro	Cob.	2,8	2,9	2,5	3,1	3,1	2,7	2,8	2,4	2,8	
		3B	Centro	Cob.	3,3	3,0	2,4	2,0	3,1	2,7	2,4	3,0	2,7	
		3C	Centro	Descob.	2,2	2,0	2,0	2,0	2,2	1,1	1,5	1,6	1,8	
		3D	Centro	Descob.	2,4	1,5	2,5	2,4	2,5	3,0	2,5	2,1	2,4	
		3E	Vale	Cob.	1,6	1,5	0,7	1,0	1,0	0,9	0,8	0,0	0,9	
		3F	Vale	Cob.	1,5	1,9	2,4	2,3	1,7	1,2	2,5	2,3	2,0	
		3G	Vale	Descob.	2,0	2,1	2,1	1,9	0,7	0,9	0,8	1,0	1,4	
		3H	Vale	Descob.	1,2	1,3	2,2	2,1	1,4	1,2	1,6	1,8	1,6	
	CPIV	0,55	4A	Centro	Cob.	3,0	2,6	2,5	2,7	3,0	2,0	2,4	2,5	2,6
			4B	Centro	Cob.	2,9	2,9	3,2	2,5	3,0	2,0	2,4	2,4	2,7
			4C	Centro	Descob.	2,0	3,0	2,5	2,8	3,5	2,0	2,1	2,1	2,5
			4D	Centro	Descob.	2,6	2,7	3,0	2,8	2,6	2,2	2,0	2,5	2,6
4E			Vale	Cob.	1,6	1,5	2,0	2,1	1,6	1,0	1,3	1,5	1,6	
4F			Vale	Cob.	1,8	1,7	1,7	2,0	0,6	0,0	0,7	1,4	1,2	
4G			Vale	Descob.	1,4	1,2	1,3	0,8	0,0	0,0	1,2	1,0	0,9	
4H			Vale	Descob.	2,5	2,1	1,2	1,0	0,6	1,1	0,5	0,4	1,2	
0,60		5A	Centro	Cob.	3,8	3,9	4,7	4,1	4,0	3,4	5,5	4,0	4,2	
		5B	Centro	Cob.	3,2	4,2	5,0	4,1	3,9	3,7	3,9	3,4	3,9	
		5C	Centro	Descob.	3,2	2,6	2,4	3,1	2,6	3,0	3,9	3,0	3,0	
		5D	Centro	Descob.	3,0	2,7	3,5	2,8	2,5	4,0	4,1	3,7	3,3	
		5E	Vale	Cob.	3,1	3,5	2,6	2,6	2,0	2,5	3,4	2,8	2,8	
		5F	Vale	Cob.	4,1	3,3	3,4	3,6	3,8	3,5	2,2	3,4	3,4	
		5G	Vale	Descob.	2,0	1,7	1,6	1,5	2,0	1,3	2,7	2,0	1,9	
		5H	Vale	Descob.	1,4	1,1	1,7	2,0	2,2	1,8	2,6	3,0	2,0	
0,65		6A	Centro	Cob.	3,2	3,1	4,2	5,0	3,8	5,1	3,5	4,0	4,0	
		6B	Centro	Cob.	4,2	3,6	5,1	5,4	5,0	4,2	4,1	4,0	4,5	
		6C	Centro	Descob.	3,1	3,1	3,9	3,0	4,2	3,0	1,7	3,0	3,1	
		6D	Centro	Descob.	4,0	3,4	3,4	3,0	5,0	4,0	4,0	4,0	3,9	
	6E	Vale	Cob.	2,1	2,4	3,2	3,7	3,2	3,0	3,0	3,1	3,0		
	6F	Vale	Cob.	3,7	3,2	3,0	3,4	2,2	2,7	3,1	3,2	3,1		
	6G	Vale	Descob.	2,0	1,7	0,8	3,2	1,4	1,2	2,7	2,3	1,9		
	6H	Vale	Descob.	2,7	2,4	3,0	2,4	2,6	2,4	2,0	2,4	2,5		

t = 180 dias														
Tipo de Cimento	A/C	CP	Local	Condição	p1 (mm)	p2 (mm)	p3 (mm)	p4 (mm)	p5 (mm)	p6 (mm)	p7 (mm)	p8 (mm)	pm (mm)	
CPV	0,55	1A	Centro	Cob.	2,0	2,0	1,9	1,7	1,3	2,5	2,6	2,6	2,1	
		1B	Centro	Cob.	3,4	3,0	2,4	2,1	1,5	0,2	2,0	1,8	2,1	
		1C	Centro	Descob.	1,7	2,2	1,6	1,4	0,7	0,4	1,2	1,4	1,3	
		1D	Centro	Descob.	2,7	3,1	1,3	1,3	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6	
		1E	Vale	Cob.	2,0	1,0	0,7	1,3	1,4	1,5	1,0	1,3	1,3	
		1F	Vale	Cob.	1,5	2,0	1,0	1,2	0,4	0,3	1,0	1,0	1,1	
		1G	Vale	Descob.	1,2	1,6	0,6	0,5	1,0	0,4	0,7	0,4	0,8	
		1H	Vale	Descob.	1,4	1,6	0,8	0,7	0,3	0,3	1,0	0,7	0,9	
	0,60	2A	Centro	Cob.	3,2	4,0	3,4	4,2	3,2	2,7	3,3	3,7	3,5	
		2B	Centro	Cob.	4,4	4,7	4,3	4,6	5,4	4,5	5,4	5,2	4,8	
		2C	Centro	Descob.	5,4	4,4	4,2	3,5	3,2	3,0	2,6	2,9	3,7	
		2D	Centro	Descob.	6,6	4,2	3,9	5,0	3,5	3,6	4,3	3,3	4,3	
		2E	Vale	Cob.	3,3	3,6	3,6	3,4	4,0	3,4	3,2	4,4	3,6	
		2F	Vale	Cob.	2,2	3,1	3,0	4,0	3,4	3,1	3,5	3,6	3,2	
		2G	Vale	Descob.	3,4	2,3	1,3	1,1	1,7	1,5	2,7	2,4	2,1	
		2H	Vale	Descob.	2,5	2,6	1,7	3,7	4,1	2,4	2,0	1,9	2,6	
	0,65	3A	Centro	Cob.	4,2	5,5	4,0	4,1	4,1	3,5	3,7	3,1	4,0	
		3B	Centro	Cob.	2,9	3,7	3,4	4,4	3,6	3,7	3,7	3,8	3,7	
		3C	Centro	Descob.	2,6	3,0	3,2	3,2	3,0	2,2	2,6	2,9	2,8	
		3D	Centro	Descob.	2,6	3,2	4,4	3,1	3,5	2,1	3,0	3,1	3,1	
		3E	Vale	Cob.	3,0	3,0	2,1	3,0	3,3	3,0	3,0	2,4	2,9	
		3F	Vale	Cob.	3,6	3,2	3,4	4,0	3,3	4,0	2,4	2,5	3,3	
		3G	Vale	Descob.	2,7	2,0	3,0	2,1	1,4	2,0	2,4	1,6	2,2	
		3H	Vale	Descob.	2,2	2,0	2,0	2,0	3,4	3,0	2,4	2,0	2,4	
	CPIV	0,55	4A	Centro	Cob.	3,9	3,5	4,4	4,8	4,1	4,0	4,7	3,2	4,1
			4B	Centro	Cob.	4,0	4,2	4,3	4,2	3,1	3,6	3,3	3,4	3,8
			4C	Centro	Descob.	3,2	3,4	3,4	3,0	2,4	2,7	4,2	4,5	3,4
			4D	Centro	Descob.	3,5	3,7	2,5	4,2	3,3	2,4	2,6	3,4	3,2
4E			Vale	Cob.	3,2	2,4	3,7	3,1	3,6	4,1	2,3	2,9	3,2	
4F			Vale	Cob.	2,2	3,2	3,0	1,7	2,7	2,2	3,2	4,3	2,8	
4G			Vale	Descob.	1,6	1,0	0,3	0,5	2,3	1,0	1,6	1,2	1,2	
4H			Vale	Descob.	1,7	1,3	2,4	1,2	1,5	0,9	2,4	1,7	1,6	
0,60		5A	Centro	Cob.	6,5	6,0	6,4	7,3	6,5	6,9	7,2	5,5	6,5	
		5B	Centro	Cob.	5,1	5,1	5,2	6,0	6,1	5,3	5,2	4,9	5,4	
		5C	Centro	Descob.	4,0	4,2	3,9	4,1	5,9	4,9	4,2	4,5	4,5	
		5D	Centro	Descob.	3,5	4,5	4,4	5,0	4,8	6,5	4,9	5,5	4,9	
		5E	Vale	Cob.	5,6	4,0	5,5	5,1	6,0	3,4	4,6	3,3	4,7	
		5F	Vale	Cob.	5,3	5,9	4,0	4,7	5,7	4,9	4,0	4,1	4,8	
		5G	Vale	Descob.	2,0	2,1	3,0	4,2	3,6	4,0	4,1	3,0	3,3	
		5H	Vale	Descob.	3,0	2,8	3,6	3,3	4,1	3,1	3,3	4,2	3,4	
0,65		6A	Centro	Cob.	5,8	6,4	6,0	6,2	6,3	6,5	5,4	5,1	6,0	
		6B	Centro	Cob.	4,4	5,5	6,0	6,1	5,0	6,3	5,7	5,5	5,6	
		6C	Centro	Descob.	4,2	4,4	5,5	5,2	4,4	5,4	5,5	4,5	4,9	
		6D	Centro	Descob.	4,6	5,1	5,3	5,1	4,8	5,5	5,5	4,5	5,1	
	6E	Vale	Cob.	4,2	4,6	5,5	4,4	4,7	5,0	6,5	6,2	5,1		
	6F	Vale	Cob.	4,5	6,0	5,7	4,0	6,2	6,0	4,3	3,5	5,0		
	6G	Vale	Descob.	2,8	2,6	4,4	3,0	3,7	3,7	3,2	1,6	3,1		
	6H	Vale	Descob.	3,0	2,5	3,2	5,5	6,0	5,0	3,3	3,0	3,9		

t = 270 dias														
Tipo de Cimento	A/C	CP	Local	Condição	p1 (mm)	p2 (mm)	p3 (mm)	p4 (mm)	p5 (mm)	p6 (mm)	p7 (mm)	p8 (mm)	pm (mm)	
CPV	0,55	1A	Centro	Cob.	3,7	4,2	3,2	3,7	2,1	2,3	3,3	2,2	3,1	
		1B	Centro	Cob.	3,4	3,5	2,4	2,6	1,5	1,1	1,5	2,7	2,3	
		1C	Centro	Descob.	1,9	2,9	1,9	1,9	1,1	0,0	1,6	0,7	1,5	
		1D	Centro	Descob.	2,8	3,0	2,4	1,3	1,6	1,3	1,3	0,0	1,7	
		1E	Vale	Cob.	2,0	1,7	1,7	1,8	1,5	1,1	1,8	1,4	1,6	
		1F	Vale	Cob.	2,3	2,6	1,2	1,0	0,7	1,2	0,9	1,0	1,4	
		1G	Vale	Descob.	1,5	1,8	0,9	0,5	0,0	0,3	0,6	0,5	0,8	
		1H	Vale	Descob.	1,6	2,0	0,7	0,9	0,7	0,5	1,0	0,5	1,0	
	0,60	2A	Centro	Cob.	4,3	3,5	5,6	4,0	3,8	3,2	5,0	4,1	4,2	
		2B	Centro	Cob.	5,5	5,2	5,0	5,0	4,8	4,9	5,8	5,6	5,2	
		2C	Centro	Descob.	4,8	4,9	5,2	5,0	5,1	4,6	5,1	5,8	5,1	
		2D	Centro	Descob.	5,2	5,1	4,9	5,4	3,4	4,8	4,2	4,6	4,7	
		2E	Vale	Cob.	3,3	3,7	5,0	3,3	5,0	5,2	4,4	3,3	4,2	
		2F	Vale	Cob.	3,8	3,1	4,7	4,3	3,3	3,9	4,0	4,2	3,9	
		2G	Vale	Descob.	2,2	2,6	3,0	4,1	2,0	3,4	3,0	2,7	2,9	
		2H	Vale	Descob.	3,0	2,9	2,5	2,4	1,6	3,0	3,0	2,8	2,7	
	0,65	3A	Centro	Cob.	3,9	5,0	5,2	4,9	4,7	5,1	4,2	4,3	4,7	
		3B	Centro	Cob.	4,5	4,8	5,7	5,1	4,0	5,5	4,4	5,2	4,9	
		3C	Centro	Descob.	3,5	3,3	4,5	3,7	2,0	2,5	2,1	1,5	2,9	
		3D	Centro	Descob.	3,9	3,2	3,6	3,9	3,8	3,6	3,6	3,1	3,6	
		3E	Vale	Cob.	3,3	2,6	3,0	3,0	3,0	4,0	2,6	3,0	3,1	
		3F	Vale	Cob.	3,3	3,7	4,6	4,7	4,5	4,1	4,3	3,7	4,1	
		3G	Vale	Descob.	2,5	2,4	3,0	4,0	1,7	1,0	1,7	2,0	2,3	
		3H	Vale	Descob.	1,6	3,2	2,4	2,5	1,6	1,6	2,6	2,9	2,3	
	CPIV	0,55	4A	Centro	Cob.	5,0	4,6	5,9	5,2	5,2	4,5	4,8	4,8	5,0
			4B	Centro	Cob.	5,7	5,1	5,0	5,3	4,5	4,0	4,6	5,4	5,0
			4C	Centro	Descob.	3,6	4,7	4,0	2,4	5,2	3,2	4,6	3,1	3,9
			4D	Centro	Descob.	4,0	3,5	3,5	2,3	2,9	1,9	3,1	4,0	3,2
4E			Vale	Cob.	1,4	3,3	3,5	3,6	4,3	4,2	4,7	3,7	3,6	
4F			Vale	Cob.	3,6	3,5	4,0	3,5	2,5	1,6	3,3	3,0	3,1	
4G			Vale	Descob.	1,7	2,4	1,3	1,0	1,6	2,2	2,0	2,4	1,8	
4H			Vale	Descob.	2,4	3,2	2,0	2,7	2,0	1,3	2,0	1,2	2,1	
0,60		5A	Centro	Cob.	6,2	6,7	8,6	7,2	7,0	7,7	7,4	8,7	7,4	
		5B	Centro	Cob.	5,8	6,6	7,2	8,3	7,0	8,1	6,4	6,5	7,0	
		5C	Centro	Descob.	5,6	4,3	5,9	6,8	6,8	6,3	5,9	6,4	6,0	
		5D	Centro	Descob.	5,2	5,1	5,0	6,6	5,4	5,3	5,9	6,8	5,7	
		5E	Vale	Cob.	5,2	5,8	4,9	7,0	6,7	6,1	5,6	4,6	5,7	
		5F	Vale	Cob.	6,3	7,0	5,2	6,0	5,0	6,0	4,8	5,0	5,7	
		5G	Vale	Descob.	3,6	3,1	4,4	3,0	4,7	3,1	3,8	4,4	3,8	
		5H	Vale	Descob.	4,7	3,5	4,7	5,0	3,2	2,7	4,6	3,2	4,0	
0,65		6A	Centro	Cob.	7,8	6,9	8,5	7,0	7,4	7,0	7,4	6,6	7,3	
		6B	Centro	Cob.	6,2	6,9	6,9	9,5	6,8	7,0	7,1	6,8	7,2	
		6C	Centro	Descob.	4,5	4,7	6,2	5,2	5,2	4,7	7,1	5,9	5,4	
		6D	Centro	Descob.	4,7	5,0	6,5	6,0	3,9	5,4	4,1	4,2	5,0	
	6E	Vale	Cob.	4,5	5,5	6,2	6,0	6,7	7,4	5,8	5,8	6,0		
	6F	Vale	Cob.	4,4	5,5	7,5	8,9	5,8	6,7	7,0	6,7	6,6		
	6G	Vale	Descob.	4,4	3,3	4,9	5,0	3,0	3,6	4,7	4,6	4,2		
	6H	Vale	Descob.	3,8	4,5	4,0	4,4	4,0	3,6	3,3	4,0	4,0		

t = 330 dias														
Tipo de Cimento	A/C	CP	Local	Condição	p1 (mm)	p2 (mm)	p3 (mm)	p4 (mm)	p5 (mm)	p6 (mm)	p7 (mm)	p8 (mm)	pm (mm)	
CPV	0,55	1A	Centro	Cob.	3,5	3,4	3,2	2,7	2,0	1,2	1,6	2,3	2,5	
		1B	Centro	Cob.	3,6	4,2	3,7	3,4	1,2	2,0	2,8	2,5	2,9	
		1C	Centro	Descob.	2,8	2,8	3,1	2,0	0,7	0,0	1,9	2,2	1,9	
		1D	Centro	Descob.	2,9	3,6	1,4	1,1	1,1	1,2	2,8	2,1	2,0	
		1E	Vale	Cob.	1,6	1,5	2,0	2,6	1,1	1,1	1,0	1,6	1,6	
		1F	Vale	Cob.	2,3	2,5	1,4	1,1	1,0	1,0	1,6	1,3	1,5	
		1G	Vale	Descob.	2,3	1,6	1,1	0,5	0,5	0,5	0,8	0,4	1,0	
		1H	Vale	Descob.	2,2	1,7	1,3	1,0	0,7	0,5	0,7	1,6	1,2	
	0,60	2A	Centro	Cob.	4,8	5,6	6,7	7,4	5,7	5,1	5,5	5,4	5,8	
		2B	Centro	Cob.	5,6	6,9	7,0	6,1	6,6	5,2	6,5	6,0	6,2	
		2C	Centro	Descob.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		2D	Centro	Descob.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		2E	Vale	Cob.	3,2	3,8	3,4	3,2	2,7	4,0	3,6	4,5	3,6	
		2F	Vale	Cob.	4,0	3,0	3,5	3,8	4,3	3,3	5,7	5,0	4,1	
		2G	Vale	Descob.	2,6	3,2	2,7	1,1	2,9	3,4	2,7	1,5	2,5	
		2H	Vale	Descob.	2,8	2,4	3,3	1,9	1,0	1,8	4,2	3,4	2,6	
	0,65	3A	Centro	Cob.	5,4	5,0	6,0	5,5	6,0	5,1	5,7	5,0	5,5	
		3B	Centro	Cob.	4,3	5,5	5,7	3,5	4,9	4,3	5,0	4,5	4,7	
		3C	Centro	Descob.	3,4	2,1	3,6	4,7	3,0	2,5	3,8	2,3	3,2	
		3D	Centro	Descob.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		3E	Vale	Cob.	2,7	2,4	3,1	3,0	2,8	4,3	4,5	2,9	3,2	
		3F	Vale	Cob.	3,5	3,0	3,6	3,0	3,7	4,4	3,0	3,3	3,4	
		3G	Vale	Descob.	3,1	1,6	3,0	1,5	1,3	1,8	3,1	2,4	2,2	
		3H	Vale	Descob.	2,0	1,7	1,7	2,2	2,1	2,5	2,4	2,8	2,2	
	CPIV	0,55	4A	Centro	Cob.	5,8	5,9	5,7	6,1	6,5	6,3	6,6	6,1	6,1
			4B	Centro	Cob.	5,1	5,0	4,4	5,5	5,8	3,8	6,1	4,8	5,1
			4C	Centro	Descob.	5,0	4,9	3,6	4,5	2,3	2,0	5,6	5,8	4,2
			4D	Centro	Descob.	3,7	3,6	5,6	5,8	5,0	3,7	6,0	3,4	4,6
4E			Vale	Cob.	6,3	3,8	5,0	5,0	4,0	3,6	4,3	3,8	4,5	
4F			Vale	Cob.	4,0	3,3	3,2	3,0	2,0	1,7	4,0	3,0	3,0	
4G			Vale	Descob.	2,2	2,5	0,9	0,6	1,0	0,5	0,6	0,7	1,1	
4H			Vale	Descob.	2,0	2,4	1,4	1,6	1,3	0,9	1,1	2,6	1,7	
0,60		5A	Centro	Cob.	7,5	7,1	7,8	9,5	8,1	8,5	7,0	8,1	8,0	
		5B	Centro	Cob.	7,0	6,6	7,2	7,7	8,0	6,3	6,5	6,6	7,0	
		5C	Centro	Descob.	5,0	5,5	4,9	5,6	5,3	5,0	6,3	5,1	5,3	
		5D	Centro	Descob.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		5E	Vale	Cob.	5,3	5,4	5,0	6,0	5,3	5,0	5,3	5,0	5,3	
		5F	Vale	Cob.	5,3	5,4	4,4	4,9	6,5	5,0	6,8	7,1	5,7	
		5G	Vale	Descob.	3,1	3,1	3,0	4,3	5,0	2,9	2,1	3,5	3,4	
		5H	Vale	Descob.	3,0	3,4	3,6	3,8	3,0	3,4	4,2	3,0	3,4	
0,65		6A	Centro	Cob.	7,3	6,7	8,6	8,8	9,0	8,2	9,0	7,6	8,2	
		6B	Centro	Cob.	6,7	7,0	8,0	8,6	9,3	8,1	9,4	9,0	8,3	
		6C	Centro	Descob.	7,7	5,7	6,2	5,1	7,0	6,0	4,7	4,0	5,8	
		6D	Centro	Descob.	5,1	5,6	6,1	5,6	7,7	6,1	6,1	7,5	6,2	
		6E	Vale	Cob.	6,5	4,5	5,6	6,7	7,0	6,5	7,2	9,7	6,7	
		6F	Vale	Cob.	5,3	5,7	4,5	5,8	5,5	5,0	5,4	6,1	5,4	
		6G	Vale	Descob.	3,2	3,5	3,2	3,1	2,4	4,7	4,1	4,3	3,6	
		6H	Vale	Descob.	3,0	4,0	3,0	3,0	2,7	3,2	4,2	3,5	3,3	

APÊNDICE B – Comparativo entre valores de profundidade de carbonatação obtidos experimentalmente para as amostras e calculados pelo Modelo de Possan (2010)

Centro CPV	Previsto (Possan)		Observado - Inicial		Diferença	
	a/c=0,55	a/c=0,55	a/c = 0,55	a/c = 0,55	Previsto - Observado	
t (dias)	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.
0	0	0	0	0	0	0
28	0,4	0,2	0,0	0,1	-0,4	-0,1
60	0,6	0,3	0,6	0,7	0,0	0,4
95	0,8	0,4	1,2	1,0	0,4	0,6
180	1,1	0,5	1,7	1,3	0,6	0,8
270	1,3	0,7	2,4	1,5	1,0	0,8
330	1,4	0,7	2,4	1,8	0,9	1,1

Centro CPV	Previsto (Possan)		Observado - Inicial		Diferença	
	a/c=0,60	a/c=0,60	a/c=0,60	a/c=0,60	Previsto - Observado	
t (dias)	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.
0	0	0	0	0		
28	0,7	0,3	0,1	0,3	-0,6	-0,1
60	1,0	0,5	1,4	1,4	0,4	0,9
95	1,2	0,6	1,5	2,0	0,3	1,4
180	1,7	0,8	3,0	3,2	1,3	2,3
270	2,1	1,0	3,6	4,1	1,5	3,1
330	2,3	1,1	4,9	-	2,6	-

Centro CPV	Previsto (Possan)		Observado - Inicial		Diferença	
	a/c=0,65	a/c=0,65	a/c=0,65	a/c=0,65	Previsto - Observado	
t (dias)	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.
0	0	0	0	0	0	0
28	0,8	0,4	0,1	0,1	-0,7	-0,3
60	1,2	0,6	0,7	0,8	-0,5	0,2
95	1,5	0,7	1,4	0,8	-0,1	0,1
180	2,1	1,0	2,4	1,7	0,3	0,7
270	2,5	1,3	3,4	2	0,9	0,7
330	2,8	1,4	3,7	-	0,9	-

Vale CPV	Previsto		Observado - Inicial		Diferença	
	a/c=0,55	a/c=0,55	a/c = 0,55	a/c = 0,55	Previsto - Observado	
t (dias)	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.
0	0,0	0,0	0	0,0		
28	0,3	0,2	0,0	0,0	-0,3	-0,2
60	0,5	0,3	0,0	0,1	-0,5	-0,2
95	0,6	0,4	0,3	0,3	-0,3	-0,1
180	0,8	0,5	1,1	0,6	0,3	0,0
270	1,0	0,7	1,4	0,6	0,4	0,0
330	1,1	0,7	1,5	0,8	0,4	0,1

Vale CPV	Previsto		Observado - Inicial		Diferença	
	a/c=0,60	a/c=0,60	a/c=0,60	a/c=0,60	Previsto - Observado	
t (dias)	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.
0	0,0	0,0	0	0,0		
28	0,5	0,3	0,0	0,0	-0,5	-0,3
60	0,7	0,5	1,6	1,3	0,8	0,9
95	0,9	0,6	2,2	1,6	1,3	1,0
180	1,3	0,8	3,4	2,3	2,1	1,5
270	1,6	1,0	4,0	2,8	2,5	1,7
330	1,7	1,1	3,8	2,6	2,1	-

Vale CPV	Previsto		Observado - Inicial		Diferença	
	a/c=0,65	a/c=0,65	a/c=0,65	a/c=0,65	Previsto - Observado	
t (dias)	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.
0	0	0	0	0,0		
28	0,6	0,4	0,0	0,0	-0,6	-0,4
60	0,9	0,6	1,1	1,2	0,2	0,6
95	1,1	0,7	1,5	1,5	0,3	0,8
180	1,6	1,0	3,1	2,3	1,5	1,2
270	1,9	1,3	3,6	2,3	1,7	1,0
330	2,1	1,4	3,3	2,2	1,2	0,8

Centro CPIV	Previsto (Possan)		Observado - Inicial		Diferença	
	a/c=0,55	a/c=0,55	a/c = 0,55	a/c = 0,55	Previsto - Observado	
t(dias)	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.
0	0,0	0,0	0	0,0		
28	1,1	0,5	0,9	0,4	-0,1	-0,1
60	1,6	0,8	2,3	1,7	0,7	0,9
95	2,0	1,0	2,6	2,5	0,7	1,5
180	2,7	1,4	3,9	3,3	1,2	1,9
270	3,3	1,7	5,0	3,5	1,7	1,8
330	3,6	1,8	5,6	4,4	2,0	2,6

Centro CPIV	Previsto (Possan)		Obsevado - inicial		Diferença	
	a/c=0,60	a/c=0,60	a/c=0,60	a/c=0,60	Previsto - Observado	
t(dias)	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.
0	0,0	0,0	0	0,0		
28	1,7	0,9	0,9	0,6	-0,8	-0,3
60	2,6	1,3	2,3	1,9	-0,3	0,6
95	3,2	1,6	3,3	2,2	0,1	0,6
180	4,4	2,2	5,2	3,7	0,8	1,5
270	5,4	2,7	6,4	4,9	1,0	2,2
330	5,9	3,0	6,7	-	0,7	-

Centro CPIV	Previsto (Possan)		Observado - Inicial		Diferença	
	a/c=0,65	a/c=0,65	a/c=0,65	a/c=0,65	Previsto - Observado	
t(dias)	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.
0	0	0	0	0,0		
28	1,6	0,8	0,9	0,0	-0,7	-0,8
60	2,3	1,2	2,3	1,9	-0,1	0,7
95	2,9	1,5	3,1	2,7	0,2	1,2
180	4,0	2,0	4,6	4,1	0,6	2,1
270	4,9	2,5	6,1	4,4	1,2	1,9
330	5,4	2,7	7,1	5,2	1,6	2,5

Vale CPIV	Previsto		Observado - inicial		Diferença	
	a/c=0,55	a/c=0,55	a/c = 0,55	a/c = 0,55	Previsto - Observado	
t(dias)	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.
0	0,0	0,0	0	0,0		
28	0,8	0,5	0,3	0,3	-0,5	-0,3
60	1,2	0,8	1,0	0,4	-0,2	-0,4
95	1,5	1,0	1,4	1,0	-0,1	0,0
180	2,1	1,3	3,0	1,4	0,9	0,1
270	2,5	1,6	3,4	2,0	0,8	0,3
330	2,8	1,8	3,8	1,4	1,0	-0,4

Vale CPIV	Previsto		Observado - inicial		Diferença	
	a/c=0,60	a/c=0,60	a/c=0,60	a/c=0,60	Previsto - Observado	
t(dias)	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.
0	0	0,0	0	0,0		
28	1,3	0,9	0,5	0,0	-0,8	-0,8
60	2,0	1,3	1,6	0,7	-0,3	-0,6
95	2,4	1,6	2,2	1,4	-0,3	-0,2
180	3,4	2,2	3,8	2,8	0,5	0,6
270	4,1	2,7	4,8	3,3	0,7	0,6
330	4,5	2,9	4,5	2,8	0,0	-0,1

Vale CPIV	Previsto		Observado - inicial		Diferença	
	a/c=0,65	a/c=0,65	a/c=0,65	a/c=0,65	Previsto - Observado	
t(dias)	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.	Coberto	Descob.
0	0	0	0	0,0		
28	1,2	0,8	0,6	0,0	-0,6	-0,8
60	1,8	1,2	1,3	0,3	-0,4	-0,9
95	2,2	1,4	2,1	1,5	-0,2	0,1
180	3,1	2,0	4,1	2,8	1,0	0,8
270	3,8	2,4	5,3	3,4	1,6	0,9
330	4,1	2,7	5,1	2,7	1,0	0,1

APÊNDICE C – Cálculo de k' e k para todas as condições estudadas

Condições	Profundidade de carbonatação Observada (y)	Tempo (dias)	k'	k	Profundidade de carbonatação calculada (ycal)	y-ycal
CPV a/c=0,55 Centro Coberto	0,35	0,08	1,26	2,6	0,72	-0,4
	0,96	0,17	2,35		1,06	-0,1
	1,58	0,26	3,09		1,33	0,2
	2,06	0,50	2,93		1,83	0,2
	2,71	0,74	3,15		2,24	0,5
	2,71	0,90	2,85		2,46	0,2
CPV a/c =0,60 Centro Coberto	1,20	0,08	4,33	5,8	1,61	-0,4
	2,49	0,17	6,08		2,37	0,1
	2,58	0,26	5,05		2,96	-0,4
	4,14	0,50	5,88		4,08	0,1
	4,71	0,74	5,47		4,99	-0,3
	6,01	0,90	6,34		5,50	0,5
CPV a/c =0,65 Centro Coberto	1,45	0,08	5,24	5,5	1,52	-0,1
	2,11	0,17	5,17		2,25	-0,1
	2,76	0,26	5,41		2,81	0,0
	3,84	0,50	5,45		3,87	0,0
	4,78	0,74	5,56		4,73	0,1
	5,09	0,90	5,37		5,21	-0,1
CPV a/c=0,55 Centro Descoberto	0,25	0,08	0,90	2,0	0,55	-0,3
	0,85	0,17	2,08		0,82	0,0
	1,14	0,26	2,23		1,02	0,1
	1,44	0,50	2,05		1,41	0,0
	1,61	0,74	1,87		1,72	-0,1
	1,98	0,90	2,09		1,90	0,1
CPV a/c =0,60 Centro Descoberto	1,06	0,08	3,84	5,2	1,44	-0,4
	2,16	0,17	5,29		2,13	0,0
	2,82	0,26	5,53		2,65	0,2
	3,98	0,50	5,64		3,66	0,3
	4,88	0,74	5,68		4,47	0,4
	-	0,90	-		4,93	-
CPV a/c =0,65 Centro Descoberto	1,31	0,08	4,74	4,1	1,14	0,2
	2,08	0,17	5,08		1,68	0,4
	2,09	0,26	4,10		2,09	0,0
	2,98	0,50	4,23		2,89	0,1
	3,24	0,74	3,76		3,53	-0,3
	-	0,90	-		3,89	-

Condições	Profundidade de carbonatação Observada (y)	Tempo (dias)	k'	k	Profundidade de carbonatação calculada (ycal)	y-ycal
CPV a/c=0,55 Vale Coberto	0,10	0,08	0,36	1,5	0,42	-0,3
	0,10	0,17	0,24		0,61	-0,5
	0,33	0,26	0,64		0,77	-0,4
	1,16	0,50	1,65		1,06	0,1
	1,49	0,74	1,74		1,29	0,2
	1,54	0,90	1,63		1,42	0,1
CPV a/c =0,60 Vale Coberto	0,93	0,08	3,34	4,1	1,14	-0,2
	1,55	0,17	3,79		1,68	-0,1
	2,21	0,26	4,34		2,09	0,1
	3,43	0,50	4,86		2,89	0,5
	4,03	0,74	4,69		3,53	0,5
	3,81	0,90	4,02		3,89	-0,1
CPV a/c =0,65 Vale Coberto	0,55	0,08	1,99	4	1,11	-0,6
	1,13	0,17	2,75		1,64	-0,5
	1,46	0,26	2,85		2,04	-0,6
	3,08	0,50	4,37		2,82	0,3
	3,59	0,74	4,17		3,44	0,1
	3,33	0,90	3,51		3,79	-0,5
CPV a/c=0,55 Vale Descoberto	0,25	0,08	0,90	1,0	0,28	0,0
	0,31	0,17	0,76		0,41	-0,1
	0,51	0,26	1,00		0,51	0,0
	0,83	0,50	1,17		0,70	0,1
	0,88	0,74	1,02		0,86	0,0
	1,09	0,90	1,15		0,95	0,1
CPV a/c =0,60 Vale Descoberto	0,88	0,08	3,16	3,0	0,83	0,0
	1,34	0,17	3,27		1,23	0,1
	1,58	0,26	3,09		1,53	0,0
	2,33	0,50	3,31		2,11	0,2
	2,76	0,74	3,21		2,58	0,2
	2,56	0,90	2,70		2,84	-0,3
CPV a/c =0,65 Vale Descoberto	1,03	0,08	3,70	2,6	0,72	0,3
	1,16	0,17	2,84		1,06	0,1
	1,52	0,26	2,98		1,33	0,2
	2,26	0,50	3,21		1,83	0,4
	2,29	0,74	2,67		2,24	0,1
	2,20	0,90	2,32		2,46	-0,3

Condições	Profundidade de carbonatação Observada (y)	Tempo (dias)	k'	k	Profundidade de carbonatação calculada (ycal)	y-ycal
CPIV a/c=0,55 Centro Coberto	0,94	0,08	3,38	5,5	1,52	-0,6
	2,31	0,17	5,66		2,25	0,1
	2,63	0,26	5,15		2,81	-0,2
	3,92	0,50	5,56		3,87	0,0
	4,98	0,74	5,78		4,73	0,2
	5,59	0,90	5,90		5,21	0,4
CPIV a/c =0,60 Centro Coberto	1,68	0,08	6,05	8	2,22	-0,5
	3,06	0,17	7,49		3,27	-0,2
	4,05	0,26	7,94		4,08	0,0
	5,95	0,50	8,45		5,63	0,3
	7,21	0,74	8,39		6,88	0,3
	7,47	0,90	7,88		7,58	-0,1
CPIV a/c =0,65 Centro Coberto	2,05	0,08	7,40	8,3	2,30	-0,2
	3,43	0,17	8,38		3,39	0,0
	4,22	0,26	8,27		4,23	0,0
	5,76	0,50	8,18		5,84	-0,1
	7,24	0,74	8,41		7,14	0,1
	8,21	0,90	8,66		7,87	0,3
CPIV a/c=0,55 Centro Descoberto	0,39	0,08	1,40	4,2	1,16	-0,8
	1,73	0,17	4,22		1,72	0,0
	2,53	0,26	4,95		2,14	0,4
	3,28	0,50	4,65		2,96	0,3
	3,50	0,74	4,07		3,61	-0,1
	4,41	0,90	4,65		3,98	0,4
CPIV a/c =0,60 Centro Descoberto	1,51	0,08	5,46	6,5	1,80	-0,3
	2,80	0,17	6,85		2,66	0,1
	3,13	0,26	6,14		3,32	-0,2
	4,68	0,50	6,64		4,58	0,1
	5,83	0,74	6,78		5,59	0,2
	-	0,90	-		6,16	-
CPIV a/c =0,65 Centro Descoberto	0,84	0,08	3,02	6,5	1,80	-1,0
	2,69	0,17	6,57		2,66	0,0
	3,49	0,26	6,84		3,32	0,2
	4,97	0,50	7,06		4,58	0,4
	5,21	0,74	6,05		5,59	-0,4
	6,01	0,90	6,34		6,16	-0,1

Condições	Profundidade de carbonatação Observada (y)	Tempo (dias)	k'	k	Profundidade de carbonatação calculada (ycal)	y-ycal
CPIV a/c=0,55 Vale Coberto	0,33	0,08	1,17	3,5	0,97	-0,6
	0,99	0,17	2,42		1,43	-0,4
	1,41	0,26	2,76		1,79	-0,4
	2,99	0,50	4,24		2,46	0,5
	3,36	0,74	3,90		3,01	0,3
	3,75	0,90	3,96		3,32	0,4
CPIV a/c =0,60 Vale Coberto	1,41	0,08	5,10	6,8	1,88	-0,5
	2,58	0,17	6,30		2,78	-0,2
	3,11	0,26	6,10		3,47	-0,4
	4,76	0,50	6,75		4,79	0,0
	5,70	0,74	6,63		5,85	-0,1
	5,48	0,90	5,78		6,45	-1,0
CPIV a/c =0,65 Vale Coberto	1,54	0,08	5,55	6,7	1,86	-0,3
	2,30	0,17	5,63		2,74	-0,4
	3,01	0,26	5,90		3,42	-0,4
	5,08	0,50	7,22		4,72	0,4
	6,28	0,74	7,30		5,76	0,5
	6,06	0,90	6,40		6,35	-0,3
CPIV a/c=0,55 Vale Descoberto	0,25	0,08	0,90	1,9	0,53	-0,3
	0,40	0,17	0,98		0,78	-0,4
	1,02	0,26	2,00		0,97	0,0
	1,41	0,50	2,01		1,34	0,1
	1,96	0,74	2,28		1,63	0,3
	1,39	0,90	1,47		1,80	-0,4
CPIV a/c =0,60 Vale Descoberto	0,59	0,08	2,12	4,0	1,11	-0,5
	1,23	0,17	3,00		1,64	-0,4
	1,91	0,26	3,75		2,04	-0,1
	3,34	0,50	4,74		2,82	0,5
	3,86	0,74	4,48		3,44	0,4
	3,40	0,90	3,59		3,79	-0,4
CPIV a/c =0,65 Vale Descoberto	0,71	0,08	2,57	4,5	1,25	-0,5
	1,00	0,17	2,45		1,84	-0,8
	2,20	0,26	4,31		2,30	-0,1
	3,53	0,50	5,01		3,17	0,4
	4,07	0,74	4,73		3,87	0,2
	3,44	0,90	3,63		4,27	-0,8

**APÊNDICE D – Valores de carbonatação calculados pelo Modelo de Possan
(2010) e pela equação simplificada**

Profundidade de carbonatação calculada pelo Modelo de Possan (2010) - Campus do Vale						
Tempo (anos)	Cimento CPV					
	Condição Protegido			Condição Desprotegido		
	a/c = 0,55	a/c = 0,60	a/c = 0,65	a/c = 0,55	a/c = 0,60	a/c = 0,65
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	1,2	1,8	1,6	0,8	1,2	1,0
2	1,6	2,6	2,2	1,1	1,7	1,5
3	2,0	3,2	2,7	1,3	2,1	1,8
4	2,3	3,7	3,2	1,5	2,4	2,1
5	2,6	4,1	3,5	1,7	2,7	2,3
6	2,9	4,5	3,9	1,9	2,9	2,5
7	3,1	4,8	4,2	2,0	3,1	2,7
8	3,3	5,2	4,5	2,1	3,4	2,9
9	3,5	5,5	4,8	2,3	3,6	3,1
10	3,7	5,8	5,0	2,4	3,8	3,3
11	3,9	6,1	5,3	2,5	3,9	3,4
12	4,0	6,3	5,5	2,6	4,1	3,6
13	4,2	6,6	5,7	2,7	4,3	3,7
14	4,4	6,8	5,9	2,8	4,4	3,9
15	4,5	7,1	6,1	2,9	4,6	4,0
16	4,7	7,3	6,3	3,0	4,8	4,1
17	4,8	7,5	6,5	3,1	4,9	4,3
18	4,9	7,8	6,7	3,2	5,0	4,4
19	5,1	8,0	6,9	3,3	5,2	4,5
20	5,2	8,2	7,1	3,4	5,3	4,6
21	5,3	8,4	7,3	3,5	5,4	4,7
22	5,5	8,6	7,4	3,6	5,6	4,8
23	5,6	8,8	7,6	3,6	5,7	4,9
24	5,7	9,0	7,8	3,7	5,8	5,1
25	5,8	9,1	7,9	3,8	5,9	5,2
26	5,9	9,3	8,1	3,9	6,1	5,3
27	6,1	9,5	8,2	3,9	6,2	5,4
28	6,2	9,7	8,4	4,0	6,3	5,5
29	6,3	9,9	8,5	4,1	6,4	5,6
30	6,4	10,0	8,7	4,1	6,5	5,6
31	6,5	10,2	8,8	4,2	6,6	5,7
32	6,6	10,3	9,0	4,3	6,7	5,8
33	6,7	10,5	9,1	4,4	6,8	5,9
34	6,8	10,7	9,2	4,4	6,9	6,0
35	6,9	10,8	9,4	4,5	7,0	6,1
36	7,0	11,0	9,5	4,5	7,1	6,2
37	7,1	11,1	9,6	4,6	7,2	6,3
38	7,2	11,3	9,8	4,7	7,3	6,4
39	7,3	11,4	9,9	4,7	7,4	6,4
40	7,4	11,6	10,0	4,8	7,5	6,5

Profundidade de carbonatação calculada pelo Modelo de Possan (2010) - Campus do Vale						
Tempo (anos)	Cimento CPIV					
	Condição Protegido			Condição Desprotegido		
	a/c = 0,55	a/c = 0,60	a/c = 0,65	a/c = 0,55	a/c = 0,60	a/c = 0,65
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	2,9	4,8	4,4	1,9	3,1	2,8
2	4,1	6,8	6,2	2,7	4,4	4,0
3	5,1	8,3	7,6	3,3	5,4	4,9
4	5,9	9,6	8,7	3,8	6,2	5,7
5	6,6	10,7	9,8	4,3	6,9	6,4
6	7,2	11,7	10,7	4,7	7,6	7,0
7	7,8	12,6	11,6	5,0	8,2	7,5
8	8,3	13,5	12,4	5,4	8,8	8,0
9	8,8	14,3	13,1	5,7	9,3	8,5
10	9,3	15,1	13,8	6,0	9,8	9,0
11	9,7	15,8	14,5	6,3	10,3	9,4
12	10,2	16,6	15,1	6,6	10,8	9,8
13	10,6	17,2	15,8	6,9	11,2	10,2
14	11,0	17,9	16,3	7,1	11,6	10,6
15	11,4	18,5	16,9	7,4	12,0	11,0
16	11,7	19,1	17,5	7,6	12,4	11,4
17	12,1	19,7	18,0	7,9	12,8	11,7
18	12,4	20,3	18,5	8,1	13,2	12,0
19	12,8	20,8	19,0	8,3	13,5	12,4
20	13,1	21,4	19,5	8,5	13,9	12,7
21	13,4	21,9	20,0	8,7	14,2	13,0
22	13,8	22,4	20,5	8,9	14,6	13,3
23	14,1	22,9	21,0	9,1	14,9	13,6
24	14,4	23,4	21,4	9,3	15,2	13,9
25	14,7	23,9	21,8	9,5	15,5	14,2
26	15,0	24,4	22,3	9,7	15,8	14,5
27	15,2	24,8	22,7	9,9	16,1	14,8
28	15,5	25,3	23,1	10,1	16,4	15,0
29	15,8	25,7	23,5	10,3	16,7	15,3
30	16,1	26,2	23,9	10,4	17,0	15,6
31	16,3	26,6	24,3	10,6	17,3	15,8
32	16,6	27,0	24,7	10,8	17,6	16,1
33	16,9	27,5	25,1	11,0	17,8	16,3
34	17,1	27,9	25,5	11,1	18,1	16,6
35	17,4	28,3	25,8	11,3	18,4	16,8
36	17,6	28,7	26,2	11,4	18,6	17,0
37	17,8	29,1	26,6	11,6	18,9	17,3
38	18,1	29,5	26,9	11,8	19,1	17,5
39	18,3	29,8	27,3	11,9	19,4	17,7
40	18,6	30,2	27,6	12,1	19,6	18,0

Profundidade de carbonatação calculada pelo Modelo de Possan (2010) - Campus Centro						
Tempo (anos)	Cimento CPV					
	Condição Protegido			Condição Desprotegido		
	a/c = 0,55	a/c = 0,60	a/c = 0,65	a/c = 0,55	a/c = 0,60	a/c = 0,65
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	1,2	1,8	1,6	0,8	1,2	1,0
2	1,7	2,6	2,3	1,1	1,7	1,5
3	2,0	3,2	2,8	1,3	2,1	1,8
4	2,4	3,7	3,2	1,5	2,4	2,1
5	2,6	4,1	3,6	1,7	2,7	2,3
6	2,9	4,5	3,9	1,9	2,9	2,5
7	3,1	4,9	4,2	2,0	3,2	2,8
8	3,3	5,2	4,5	2,2	3,4	2,9
9	3,5	5,5	4,8	2,3	3,6	3,1
10	3,7	5,8	5,1	2,4	3,8	3,3
11	3,9	6,1	5,3	2,5	4,0	3,4
12	4,07	6,4	5,5	2,6	4,2	3,6
13	4,24	6,7	5,77	2,8	4,3	3,8
14	4,40	6,9	5,99	2,9	4,5	3,9
15	4,55	7,2	6,20	3,0	4,6	4,0
16	4,70	7,4	6,40	3,1	4,8	4,2
17	4,85	7,6	6,60	3,2	4,9	4,3
18	5,0	7,8	6,79	3,2	5,1	4,4
19	5,1	8,0	7,0	3,3	5,2	4,5
20	5,3	8,3	7,2	3,4	5,4	4,7
21	5,4	8,5	7,3	3,5	5,5	4,8
22	5,5	8,7	7,5	3,6	5,6	4,9
23	5,6	8,9	7,7	3,7	5,8	5,0
24	5,8	9,0	7,8	3,7	5,9	5,1
25	5,9	9,2	8,0	3,8	6,0	5,2
26	6,0	9,4	8,2	3,9	6,1	5,3
27	6,1	9,6	8,3	4,0	6,2	5,4
28	6,2	9,8	8,5	4,0	6,4	5,5
29	6,3	9,9	8,6	4,1	6,5	5,6
30	6,4	10,1	8,8	4,2	6,6	5,7
31	6,5	10,3	8,9	4,3	6,7	5,8
32	6,6	10,4	9,1	4,3	6,8	5,9
33	6,8	10,6	9,2	4,4	6,9	6,0
34	6,9	10,8	9,3	4,5	7,0	6,1
35	7,0	10,9	9,5	4,5	7,1	6,2
36	7,1	11,1	9,6	4,6	7,2	6,2
37	7,1	11,2	9,7	4,6	7,3	6,3
38	7,2	11,4	9,9	4,7	7,4	6,4
39	7,3	11,5	10,0	4,8	7,5	6,5
40	7,4	11,7	10,1	4,8	7,6	6,6

Profundidade de carbonatação calculada pelo Modelo de Possan (2010) - Campus Centro						
Tempo (anos)	Cimento CPIV					
	Condição Protegido			Condição Desprotegido		
	a/c = 0,55	a/c = 0,60	a/c = 0,65	a/c = 0,55	a/c = 0,60	a/c = 0,65
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	3,0	4,8	4,4	1,9	3,1	2,9
2	4,2	6,8	6,2	2,7	4,4	4,0
3	5,1	8,3	7,6	3,3	5,4	5,0
4	5,9	9,6	8,8	3,8	6,3	5,7
5	6,6	10,8	9,9	4,3	7,0	6,4
6	7,2	11,8	10,8	4,7	7,7	7,0
7	7,8	12,7	11,7	5,1	8,3	7,6
8	8,4	13,6	12,5	5,4	8,9	8,1
9	8,9	14,5	13,2	5,8	9,4	8,6
10	9,3	15,2	13,9	6,1	9,9	9,1
11	9,8	16,0	14,6	6,4	10,4	9,5
12	10,2	16,7	15,3	6,7	10,8	9,9
13	10,66	17,4	15,9	6,9	11,3	10,3
14	11,06	18,0	16,5	7,2	11,7	10,7
15	11,45	18,7	17,1	7,4	12,1	11,1
16	11,82	19,3	17,6	7,7	12,5	11,5
17	12,19	19,9	18,2	7,9	12,9	11,8
18	12,54	20,4	18,7	8,2	13,3	12,1
19	12,9	21,0	19,2	8,4	13,7	12,5
20	13,2	21,5	19,7	8,6	14,0	12,8
21	13,5	22,1	20,2	8,8	14,4	13,1
22	13,9	22,6	20,7	9,0	14,7	13,4
23	14,2	23,1	21,1	9,2	15,0	13,7
24	14,5	23,6	21,6	9,4	15,3	14,0
25	14,8	24,1	22,0	9,6	15,7	14,3
26	15,1	24,6	22,5	9,8	16,0	14,6
27	15,4	25,0	22,9	10,0	16,3	14,9
28	15,6	25,5	23,3	10,2	16,6	15,2
29	15,9	25,9	23,7	10,3	16,9	15,4
30	16,2	26,4	24,1	10,5	17,2	15,7
31	16,5	26,8	24,5	10,7	17,4	15,9
32	16,7	27,3	24,9	10,9	17,7	16,2
33	17,0	27,7	25,3	11,0	18,0	16,4
34	17,2	28,1	25,7	11,2	18,3	16,7
35	17,5	28,5	26,1	11,4	18,5	16,9
36	17,7	28,9	26,4	11,5	18,8	17,2
37	18,0	29,3	26,8	11,7	19,1	17,4
38	18,2	29,7	27,2	11,8	19,3	17,7
39	18,5	30,1	27,5	12,0	19,6	17,9
40	18,7	30,5	27,9	12,2	19,8	18,1

Profundidade de carbonatação calculada pela equação simplificada - Campus do Vale						
Tempo (anos)	Cimento CPV					
	Condição Protegido			Condição Desprotegido		
	a/c = 0,55	a/c = 0,60	a/c = 0,65	a/c = 0,55	a/c = 0,60	a/c = 0,65
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	1,5	4,1	4,0	1,0	3,0	2,6
2	2,1	5,8	5,7	1,4	4,2	3,7
3	2,6	7,1	6,9	1,7	5,2	4,5
4	3,0	8,2	8,0	2,0	6,0	5,2
5	3,4	9,2	8,9	2,2	6,7	5,8
6	3,7	10,0	9,8	2,4	7,3	6,4
7	4,0	10,8	10,6	2,6	7,9	6,9
8	4,2	11,6	11,3	2,8	8,5	7,4
9	4,5	12,3	12,0	3,0	9,0	7,8
10	4,7	13,0	12,6	3,2	9,5	8,2
11	5,0	13,6	13,3	3,3	9,9	8,6
12	5,2	14,2	13,9	3,5	10,4	9,0
13	5,4	14,8	14,4	3,6	10,8	9,4
14	5,6	15,3	15,0	3,7	11,2	9,7
15	5,8	15,9	15,5	3,9	11,6	10,1
16	6,0	16,4	16,0	4,0	12,0	10,4
17	6,2	16,9	16,5	4,1	12,4	10,7
18	6,4	17,4	17,0	4,2	12,7	11,0
19	6,5	17,9	17,4	4,4	13,1	11,3
20	6,7	18,3	17,9	4,5	13,4	11,6
21	6,9	18,8	18,3	4,6	13,7	11,9
22	7,0	19,2	18,8	4,7	14,1	12,2
23	7,2	19,7	19,2	4,8	14,4	12,5
24	7,3	20,1	19,6	4,9	14,7	12,7
25	7,5	20,5	20,0	5,0	15,0	13,0
26	7,6	20,9	20,4	5,1	15,3	13,3
27	7,8	21,3	20,8	5,2	15,6	13,5
28	7,9	21,7	21,2	5,3	15,9	13,8
29	8,1	22,1	21,5	5,4	16,2	14,0
30	8,2	22,5	21,9	5,5	16,4	14,2
31	8,4	22,8	22,3	5,6	16,7	14,5
32	8,5	23,2	22,6	5,7	17,0	14,7
33	8,6	23,6	23,0	5,7	17,2	14,9
34	8,7	23,9	23,3	5,8	17,5	15,2
35	8,9	24,3	23,7	5,9	17,7	15,4
36	9,0	24,6	24,0	6,0	18,0	15,6
37	9,1	24,9	24,3	6,1	18,2	15,8
38	9,2	25,3	24,7	6,2	18,5	16,0
39	9,4	25,6	25,0	6,2	18,7	16,2
40	9,5	25,9	25,3	6,3	19,0	16,4

Profundidade de carbonatação calculada pela equação simplificada - Campus do Vale						
Tempo (anos)	Cimento CPIV					
	Condição Protegido			Condição Desprotegido		
	a/c = 0,55	a/c = 0,60	a/c = 0,65	a/c = 0,55	a/c = 0,60	a/c = 0,65
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	3,5	6,8	6,7	1,9	4,0	4,5
2	4,9	9,6	9,5	2,7	5,7	6,4
3	6,1	11,8	11,6	3,3	6,9	7,8
4	7,0	13,6	13,4	3,8	8,0	9,0
5	7,8	15,2	15,0	4,2	8,9	10,1
6	8,6	16,7	16,4	4,7	9,8	11,0
7	9,3	18,0	17,7	5,0	10,6	11,9
8	9,9	19,2	19,0	5,4	11,3	12,7
9	10,5	20,4	20,1	5,7	12,0	13,5
10	11,1	21,5	21,2	6,0	12,6	14,2
11	11,6	22,6	22,2	6,3	13,3	14,9
12	12,1	23,6	23,2	6,6	13,9	15,6
13	12,6	24,5	24,2	6,9	14,4	16,2
14	13,1	25,4	25,1	7,1	15,0	16,8
15	13,6	26,3	25,9	7,4	15,5	17,4
16	14,0	27,2	26,8	7,6	16,0	18,0
17	14,4	28,0	27,6	7,8	16,5	18,6
18	14,8	28,8	28,4	8,1	17,0	19,1
19	15,3	29,6	29,2	8,3	17,4	19,6
20	15,7	30,4	30,0	8,5	17,9	20,1
21	16,0	31,2	30,7	8,7	18,3	20,6
22	16,4	31,9	31,4	8,9	18,8	21,1
23	16,8	32,6	32,1	9,1	19,2	21,6
24	17,1	33,3	32,8	9,3	19,6	22,0
25	17,5	34,0	33,5	9,5	20,0	22,5
26	17,8	34,7	34,2	9,7	20,4	22,9
27	18,2	35,3	34,8	9,9	20,8	23,4
28	18,5	36,0	35,5	10,1	21,2	23,8
29	18,8	36,6	36,1	10,2	21,5	24,2
30	19,2	37,2	36,7	10,4	21,9	24,6
31	19,5	37,9	37,3	10,6	22,3	25,1
32	19,8	38,5	37,9	10,7	22,6	25,5
33	20,1	39,1	38,5	10,9	23,0	25,9
34	20,4	39,7	39,1	11,1	23,3	26,2
35	20,7	40,2	39,6	11,2	23,7	26,6
36	21,0	40,8	40,2	11,4	24,0	27,0
37	21,3	41,4	40,8	11,6	24,3	27,4
38	21,6	41,9	41,3	11,7	24,7	27,7
39	21,9	42,5	41,8	11,9	25,0	28,1
40	22,1	43,0	42,4	12,0	25,3	28,5

Profundidade de carbonatação calculada pela equação simplificada – Campus Centro						
Tempo (anos)	Cimento CPV					
	Condição Protegido			Condição Desprotegido		
	a/c = 0,55	a/c = 0,60	a/c = 0,65	a/c = 0,55	a/c = 0,60	a/c = 0,65
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	2,6	5,8	5,5	2,0	5,2	4,1
2	3,7	8,2	7,8	2,8	7,4	5,8
3	4,5	10,0	9,5	3,5	9,0	7,1
4	5,2	11,6	11,0	4,0	10,4	8,2
5	5,8	13,0	12,3	4,5	11,6	9,2
6	6,4	14,2	13,5	4,9	12,7	10,0
7	6,9	15,3	14,6	5,3	13,8	10,8
8	7,4	16,4	15,6	5,7	14,7	11,6
9	7,8	17,4	16,5	6,0	15,6	12,3
10	8,2	18,3	17,4	6,3	16,4	13,0
11	8,6	19,2	18,2	6,6	17,2	13,6
12	9,0	20,1	19,1	6,9	18,0	14,2
13	9,4	20,9	19,8	7,2	18,7	14,8
14	9,7	21,7	20,6	7,5	19,5	15,3
15	10,1	22,5	21,3	7,7	20,1	15,9
16	10,4	23,2	22,0	8,0	20,8	16,4
17	10,7	23,9	22,7	8,2	21,4	16,9
18	11,0	24,6	23,3	8,5	22,1	17,4
19	11,3	25,3	24,0	8,7	22,7	17,9
20	11,6	25,9	24,6	8,9	23,3	18,3
21	11,9	26,6	25,2	9,2	23,8	18,8
22	12,2	27,2	25,8	9,4	24,4	19,2
23	12,5	27,8	26,4	9,6	24,9	19,7
24	12,7	28,4	26,9	9,8	25,5	20,1
25	13,0	29,0	27,5	10,0	26,0	20,5
26	13,3	29,6	28,0	10,2	26,5	20,9
27	13,5	30,1	28,6	10,4	27,0	21,3
28	13,8	30,7	29,1	10,6	27,5	21,7
29	14,0	31,2	29,6	10,8	28,0	22,1
30	14,2	31,8	30,1	11,0	28,5	22,5
31	14,5	32,3	30,6	11,1	29,0	22,8
32	14,7	32,8	31,1	11,3	29,4	23,2
33	14,9	33,3	31,6	11,5	29,9	23,6
34	15,2	33,8	32,1	11,7	30,3	23,9
35	15,4	34,3	32,5	11,8	30,8	24,3
36	15,6	34,8	33,0	12,0	31,2	24,6
37	15,8	35,3	33,5	12,2	31,6	24,9
38	16,0	35,8	33,9	12,3	32,1	25,3
39	16,2	36,2	34,3	12,5	32,5	25,6
40	16,4	36,7	34,8	12,6	32,9	25,9

Profundidade de carbonatação calculada pela equação simplificada - Campus Centro						
Tempo (anos)	Cimento CPIV					
	Condição Protegido			Condição Desprotegido		
	a/c = 0,55	a/c = 0,60	a/c = 0,65	a/c = 0,55	a/c = 0,60	a/c = 0,65
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	5,7	8,4	8,3	4,2	6,6	6,5
2	8,1	11,9	11,7	5,9	9,3	9,2
3	9,9	14,5	14,4	7,3	11,4	11,3
4	11,4	16,8	16,6	8,4	13,2	13,0
5	12,7	18,8	18,6	9,4	14,8	14,5
6	14,0	20,6	20,3	10,3	16,2	15,9
7	15,1	22,2	22,0	11,1	17,5	17,2
8	16,1	23,8	23,5	11,9	18,7	18,4
9	17,1	25,2	24,9	12,6	19,8	19,5
10	18,0	26,6	26,2	13,3	20,9	20,6
11	18,9	27,9	27,5	13,9	21,9	21,6
12	19,7	29,1	28,8	14,5	22,9	22,5
13	20,6	30,3	29,9	15,1	23,8	23,4
14	21,3	31,4	31,1	15,7	24,7	24,3
15	22,1	32,5	32,1	16,3	25,6	25,2
16	22,8	33,6	33,2	16,8	26,4	26,0
17	23,5	34,6	34,2	17,3	27,2	26,8
18	24,2	35,6	35,2	17,8	28,0	27,6
19	24,8	36,6	36,2	18,3	28,8	28,3
20	25,5	37,6	37,1	18,8	29,5	29,1
21	26,1	38,5	38,0	19,2	30,2	29,8
22	26,7	39,4	38,9	19,7	31,0	30,5
23	27,3	40,3	39,8	20,1	31,7	31,2
24	27,9	41,2	40,7	20,6	32,3	31,8
25	28,5	42,0	41,5	21,0	33,0	32,5
26	29,1	42,8	42,3	21,4	33,7	33,1
27	29,6	43,6	43,1	21,8	34,3	33,8
28	30,2	44,4	43,9	22,2	34,9	34,4
29	30,7	45,2	44,7	22,6	35,5	35,0
30	31,2	46,0	45,5	23,0	36,1	35,6
31	31,7	46,8	46,2	23,4	36,7	36,2
32	32,2	47,5	47,0	23,8	37,3	36,8
33	32,7	48,3	47,7	24,1	37,9	37,3
34	33,2	49,0	48,4	24,5	38,5	37,9
35	33,7	49,7	49,1	24,8	39,0	38,5
36	34,2	50,4	49,8	25,2	39,6	39,0
37	34,7	51,1	50,5	25,5	40,1	39,5
38	35,1	51,8	51,2	25,9	40,7	40,1
39	35,6	52,5	51,8	26,2	41,2	40,6
40	36,0	53,1	52,5	26,6	41,7	41,1

