

**FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS
CURSO: ENGENHARIA CIVIL**

MARIANA DE ALMEIDA SABINO
MATRÍCULA: 21015855

**AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO EM PILARES DE CONCRETO
ARMADO EM GARAGENS: ESTUDO DE CASO**

Brasília
2014

MARIANA DE ALMEIDA SABINO

**AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO EM PILARES DE CONCRETO
ARMADO EM GARAGENS: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Curso (TC) apresentado
como um dos requisitos para a
conclusão do curso de Engenharia Civil
do UniCEUB– Centro Universitário de
Brasília

Orientadora: Eng^a Civil Irene de
Azevedo Lima Joffily, M.Sc.

**Brasília
2014**

MARIANA DE ALMEIDA SABINO

**AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO EM PILARES DE CONCRETO
ARMADO EM GARAGENS: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Curso (TC) apresentado
como um dos requisitos para a
conclusão do curso de Engenharia Civil
do UniCEUB– Centro Universitário de
Brasília

Orientadora: Eng^a Civil Irene de
Azevedo Lima Joffily, M.Sc.

Brasília, 04 de dezembro de 2014.

Banca Examinadora

Eng^a Civil Irene de Azevedo Lima Joffily, M.Sc.
Orientadora

Eng^a Civil Neusa Maria Bezerra Mota, D.Sc.
Examinador Interno

Eng^a Civil Eliane Kraus de Castro, D.Sc.
Examinador Externo, UnB

Agradecimentos

À Deus, primeiramente, se eu tive força e coragem para chegar até aqui, devo tudo à Ele.

À professora Irene, pela orientação e dedicação nesses meses de trabalho, pela paciência e compreensão e por ser a responsável por esse estudo.

Aos meus pais, pelo incentivo, apoio, amor incondicional e todo sacrifício que fazem por mim.

À minha irmã Kellen e minha sobrinha Camila, pela torcida, pelo incentivo, pelas conversas e pela alegria que me trazem.

Às minhas primas Natália e Carol, pelo amor preocupação e carinho durante toda essa jornada, por se fazerem sempre presentes na minha vida, e pela torcida.

À toda minha família, por demonstrarem orgulho e me motivarem a seguir em frente, em especial à minha amada avó Dorinha.

À minha madrinha Viviane, pelo carinho, apoio e incentivo.

Ao meu primo Leonardo (*i.m.*), por ter sido um exemplo de pessoa disposta na vida, sem nunca perder o bom humor, por me olhar de seu lugar.

Ao técnico de laboratório Dida, pela boa vontade, pelo tempo que dedicou ao meu estudo.

A todos meus amigos de turma, posso dizer que nesses 5 anos fiz amizades que vou levar para toda a vida, pela nossa união e por termos passado os momentos difíceis e sofridos sempre juntos.

Aos estudos na casa do João Pedro e do Elias, pelos momentos divertidos que passamos nesses dias, mesmo com tantas preocupações, foram decisivos para chegarmos até aqui e com certeza irão fazer muita falta.

Às amigas Luiza e Marina, por torcerem por mim, pela atenção, pela paciência e por estarem sempre perto.

A todos professores que contribuíram para minha formação acadêmica.

A todos que contribuíram de alguma forma, mesmo que indiretamente, nessa longa etapa da minha vida, que me ajudaram e me apoiaram para essa nova fase que se inicia, muito obrigada!

RESUMO

Esse trabalho trata de um estudo sobre a carbonatação natural do concreto em garagens. E, tem a intenção principal de medir e avaliar a frente de carbonatação das estruturas de concreto armado na cidade de Brasília, por meio de estudo de caso. Trata-se de garagens com características diferentes, levando em consideração a idade do concreto, umidade relativa do ar, umidade do concreto, concentração de CO₂ e temperatura. O procedimento consiste em romper o concreto de cobertura dos pilares, e medir a profundidade carbonatada, por entender que em garagens há uma maior concentração de dióxido de carbono. Os resultados foram analisados considerando-se uma série de fatores, inclusive os ambientais, que influenciam profundidade de carbonatação, como revestimentos contidos nos pilares. Foi empregado um modelo matemático de previsão de vida útil para carbonatação para estimar a vida útil dessas estruturas. Observou-se a maior frente de carbonatação ocorreu para o prédio mais novo, porém com maior teor de CO₂. As garagens que possuíam revestimentos mais espessos nos pilares, como argamassa ou camada de pintura texturizada, percebeu-se que esses revestimentos, de fato, dificultaram a difusão do CO₂ através do concreto.

Palavras chaves: carbonatação, concreto, garagem.

ABSTRACT

This research presents a study about the natural carbonation of concrete in garages. Its main purpose is to evaluate the carbonation depth in the reinforced concrete in the city of Brasilia, by means of a real case study. The studied garages have different characteristics, taking into consideration the age of the construction, relative humidity, concrete humidity, CO₂ concentration and temperature. The procedure consisted in breaking the concrete cover of the columns and measuring the carbonation depth, since it is understood that there is usually a higher percentage of carbon dioxide in garages. For the analysis of this research, a series of factors were taken into consideration, including environmental issues, which influenced in the carbonation depth measures and the columns covering. A mathematical model was used to forecast the concrete durability. The reason for that is that a higher carbonation depth was found in the newest constructions, although they had higher CO₂ concentration. As for the garages that had the thickest coverings on the columns, like parget and a thick ink, it was noticed that these kind of coverings offer a high level of difficulty to the diffusion of CO₂ through the concrete.

Key words: carbonation, concrete, garage

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
SUMÁRIO	7
1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivo Específico	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 Corrosão de armaduras.....	17
3.2 Carbonatação do concreto	20
3.3 Fatores que influenciam a carbonatação	25
3.3.1. Meio Ambiente	25
3.4 Durabilidade e vida útil de estruturas	35
3.5 Métodos de previsão de vida útil.....	42
3.5.1 Método com base nas experiências anteriores	42
3.5.2 Método com base nos ensaios acelerados	43
3.5.3 Método com enfoque determinista	44
3.5.3 Método com enfoque estocástico ou probabilista	46
3.6 MODELOS MATEMÁTICOS.....	46
4 METODOLOGIA DE TRABALHO	51
4.1 Caracterização dos edifícios estudados	51
4.1.1 Garagem do Edifício de Águas Claras (GARAGEM A)	51
4.1.2 Garagem do Edifício da 105 sul (GARAGEM B)	52
4.1.3 Garagem do Edifício de Taguatinga (GARAGEM C)	54
4.2 Descrição dos ensaios realizados.....	56
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	60
5.1 Condições ambientais.....	60

5.2 Umidade do concreto	63
5.3 Profundidade de carbonatação	65
5.4 Análise comparativa	70
5.5 Previsão de vida útil	71
6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01 - Esquema simplificado: modelo de corrosão da armadura do concreto.....	18
Figura 02 - Representação do avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo.....	21
Figura 03 – Grau de carbonatação em relação a umidade relativa do ambiente.....	29
Figura 04 - Influência da cura e da água/ cimento na carbonatação do concreto obtida por procedimento acelerado em concretos produzidos com cimento CP II F- 32.....	33
Figura 05 - Variação da profundidade de carbonatação em função do tempo e da relação água/ cimento.....	34
Figura 06 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão de armaduras.....	39
Figura 07 - Localização da Garagem de Águas Claras.....	52
Figura 08 - Localização da garagem na 105 sul.....	54
Figura 09 - Localização da garagem de Taguatinga.....	55
Figura 10 - Equipamento de medição de umidade relativa e temperatura	57
Figura 11 - Equipamento de medição de dióxido de carbono (CO ₂)	59
Figura 12 - Gráfico comparativo da umidade relativa do ar.....	62
Figura 13 - Gráfico comparativo da temperatura.....	62
Figura 14 - Gráfico comparativo da concentração de CO ₂	63
Figura 15 – Aplicação da fenolftaleína na garagem A.....	66
Figura 16 – Aplicação da fenolftaleína na garagem B.....	67
Figura 17 – Aplicação da fenolftaleína na garagem C.....	69

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 01 – Reação de carbonatação.....	22
Equação 02 – Modelo matemático para cálculo da vida útil segundo Tuutti (1982).....	24
Equação 03 – Cálculo do coeficiente de aceleração.....	44
Equação 04 – Cálculo da umidade do concreto (w%).....	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 01 – Concentrações de CO ₂ usuais.....	26
Tabela 02 – Teor de CO ₂ de alguns ambientes.....	27
Tabela 03 – Classes de agressividade ambiental.....	40
Tabela 04 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e a qualidade do concreto.....	40
Tabela 05 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c=10\text{mm}$	41
Tabela 06 – Modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação do concreto.....	47, 48, 49 e 50
Tabela 07 - Dados climáticos de Brasília do ano de 2013.....	60
Tabela 08 – Resultados das condições ambientais solo	60
Tabela 09 - Resultados da umidade do concreto na garagem A.....	64
Tabela 10 – Resultados da umidade do concreto na garagem B.....	64
Tabela 11 – Resultados da umidade do concreto na garagem C.....	65
Tabela 12 – Resultados referentes a profundidade de carbonatação na garagem A.....	66
Tabela 13 – Resultados referentes a profundidade de carbonatação na garagem B.....	68
Tabela 14 – Resultados referentes a profundidade ao cobrimento na garagem C.....	69
Tabela 15 – Análise comparativa dos resultados.....	70
Tabela 16 – Previsão de vida útil na garagem A.....	72

ÍNDICE DE SIMBOLOS

CO_2	Dióxido de carbono
Ca(OH)_2	Hidróxido de cálcio
CaCO_3	Carbonato de cálcio
H_2O	Água

ÍNDICE DE ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR.....	Norma Brasileira
W	Umidade
Ddp.....	Diferença de potencial
a/c	Relação água/ cimento
a/agl	Relação água/ aglomerante
ACI.....	American Concrete Institute
ASTM.....	American Society for Testing and Materials
EN	Norma Européia
CEB-FIP.....	Comite Euro-Internacional du Beton
CETESB.....	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado se mostrou um material muito adequado para utilização em estruturas na construção civil, porém, mesmo possuindo uma alta durabilidade diante de manutenção correta, ele está sujeito à manifestações patológicas, que podem ter diversas causas.

A corrosão de armaduras é uma patologia frequente e muitas vezes um processo complexo, pois apresenta uma série de fatores intervenientes e todos devem ser levados em consideração para fins de avaliação da causa do problema.

No Brasil, muitos são os estudos realizados sobre o tema corrosão do aço de estruturas de concreto armado. Um estudo sobre manifestações patológicas realizado no Rio Grande do Sul, mostrou que a incidência de corrosão de armadura em estruturas é da ordem de 11% do total de problemas patológicos encontrados, porém esse percentual pode subir para 40% quando analisamos o quesito gravidade e comprometimento da segurança estrutural (HELENE, 2013).

Só há corrosão da armadura quando a mesma se encontra despassivada em meio à continuidade de penetração de agentes agressivos pelo concreto, podemos destacar entre eles o dióxido de carbono, CO_2 , e os íons de cloreto.

Nesse estudo, será dado maior enfoque na reação química que ocorre com o cimento hidratado e o CO_2 , conhecida como carbonatação do concreto. Quando acontece esse tipo de reação, o pH do concreto, que deve-se manter alcalino, por volta de 13, para garantir uma armadura com película passivadora, ocorre uma diminuição no seu pH. A frente de carbonatação, que seria a parte do concreto que diminuiu a alcalinidade, vai avançando pelo interior do concreto até atingir à armadura, deixando um ambiente favorável ao desenvolvimento da corrosão.

A reação química da carbonatação ocorre entre a umidade do concreto e o dióxido de carbono, por isso entende-se que a umidade presente no concreto e a umidade relativa do ar são fatores com grande influência na velocidade de carbonatação. Estudos indicam que de uma forma geral, a faixa de umidade relativa do ar compreendida entre 50% e 85%, é considerada a que mais favorece o avanço da frente de carbonatação.

Brasília é uma cidade conhecida por enfrentar um período do ano com umidades relativas muito baixas, e em casos de umidade baixa no ambiente dificulta a carbonatação,

pois diminui a umidade no interior do concreto. Apenas a presença de CO_2 , sem a água, não é suficiente para acontecer a reação química. Por outro lado, isso não acontece o ano todo, e na maior parte do ano a cidade de Brasília se encaixa na faixa de umidade considerada favorável ao fenômeno, portanto a nossa hipótese é de que existe carbonatação na cidade.

Apesar de ser uma área ainda pouco explorada, já temos estudos importantes e alguns modelos matemáticos com a pretensão de estimar o tempo que leva até a despassivação da armadura, ou seja, até que a frente de carbonatação vença o cobrimento de concreto e atinja o aço.

Os estudos sobre o tema combinam modelos matemáticos e probabilísticos para prever esse período de tempo, para isso é necessário conhecer todos os fatores que influenciam na carbonatação para uma análise mais apropriada e com resultados confiáveis, porém nem todos os fatores são de fácil controle. Por isso, a dificuldade de se realizar estudos mais precisos nessa área. Essas pesquisas possuem um objetivo maior que geralmente é prever a vida útil de uma estrutura.

Uma série de fatores podem influenciar no avanço do CO_2 pelo concreto. Para entender o processo sabe-se que, de uma forma geral, quanto maior a porosidade mais fácil será a penetração do dióxido de carbono pelo concreto. Portanto, todos os processos que influenciem na porosidade do concreto como: relação a/c, cura adequada, lançamento e adensamento são muito importantes para garantir a vida útil e durabilidade do concreto. Ainda temos outros fatores intervenientes, como as condições ambientais: concentração de CO_2 no ambiente, umidade relativa do ar e temperatura.

Esse trabalho tem como objetivo avaliar a carbonatação em garagens do Distrito Federal, considerando os fatores que interferem no processo.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral determinar a profundidade de carbonatação nos pilares de garagem de três edifícios no Distrito Federal.

2.2 Objetivo Específico

- Analisar a profundidade de carbonatação em concretos de diferentes idades;
- Verificar a influência do teor de CO₂ e da umidade do ar na profundidade de carbonatação;
- Determinar a vida útil das estruturas utilizando modelo de previsão da carbonatação;
- Medir a umidade do concreto dos pilares estudados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Corrosão de armaduras

Corrosão de armaduras pode ser definida como a interação destrutiva entre o material e o meio ambiente, por ação física, química, eletroquímica ou ainda a combinação destas. (HELENE, 1993).

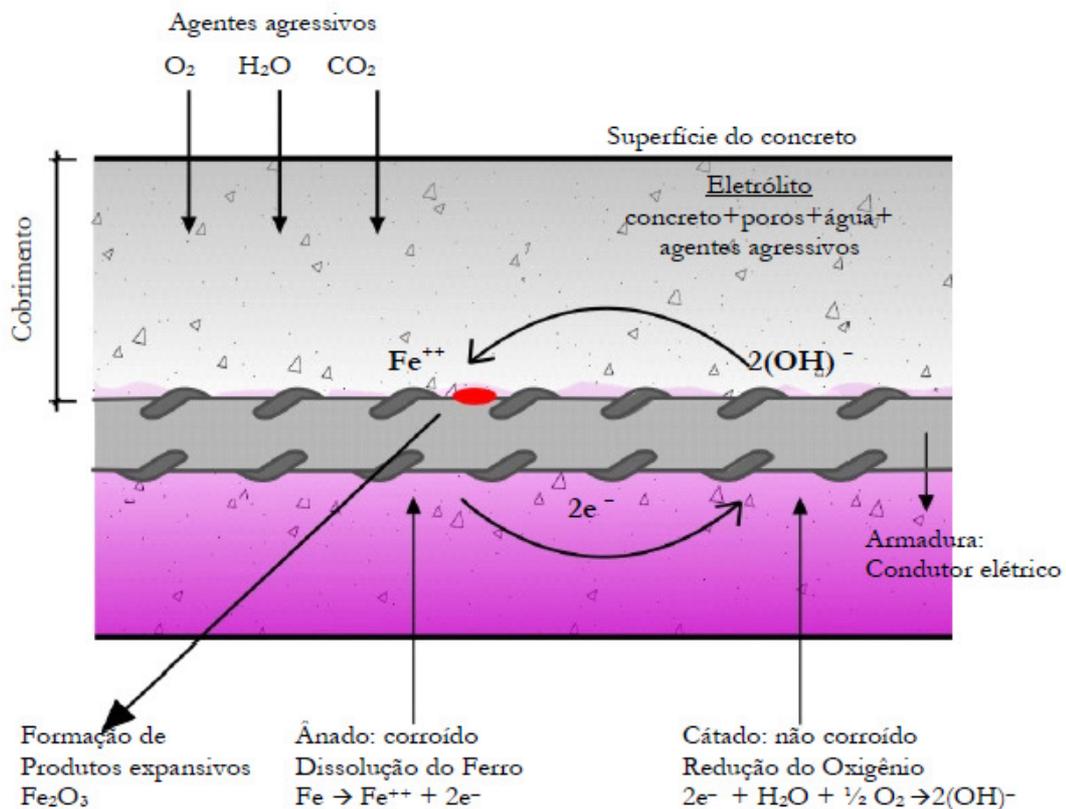
Ainda segundo Helene (1993), para corrosão do aço dois são os processos que agem: a oxidação direta e a corrosão eletroquímica (de maior importância no caso de corrosão de armaduras). Na primeira, os átomos do aço reagem diretamente com o oxigênio da atmosfera, é uma reação gás-metal. A segunda tem como resultado a formação de pilhas, devido à presença de umidade, água ou solução aquosa, que de alguma forma atuam como eletrólito, esse processo não é uniforme.

A corrosão de natureza eletroquímica ocorre necessariamente em meio aquoso, e é resultado da formação de pilhas ou células de corrosão quando existe um eletrólito, uma diferença de potencial (ddp) e oxigênio, esse processo pode ser acelerado na presença de agentes agressivos. A combinação desses fatores resulta na formação de produtos de corrosão e liberação de energia, processo inverso da Metalurgia Extrativa, no qual o metal retorna ao seu estado original, tem características expansivas. Esse é o processo tido como grande causador de danos às estruturas de concreto armado (POSSAN, 2010).

Os metais se encontram na natureza em forma de compostos, óxidos e hidróxidos, pois nessa forma eles se encontram em seu estado mínimo energético, que é mais estável, por isso o processo de corrosão é espontâneo. Esses metais são processados para serem encontrados em seu estado metálico, processo esse que demanda muita energia, e quando entram em contato com o meio ambiente, começam a agir espontaneamente e tendem a voltar ao seu estado natural, transformando-se em composto (SOUSA, 2013).

Na corrosão eletroquímica, os elétrons se movimentam no aço, partindo de regiões anódicas para regiões catódicas, completando o circuito elétrico através do eletrólito, que é uma solução iônica, conforme esquematizado na Figura 01 (HELENE, 1993).

Figura 01: Esquema simplificado: modelo de corrosão da armadura do concreto.



Fonte: CEB 152, 1984 *apud* Possan, 2010.

A corrosão pode ser classificada em localizada ou generalizada. Na corrosão generalizada o desgaste do material ocorre de forma uniforme, mas se processa em áreas extensas ao longo do metal. A corrosão localizada se processa em uma superfície limitada, e se aprofunda rapidamente, é um meio termo entre a corrosão generalizada e a corrosão por pite. A corrosão por pites atua em regiões discretas do material, mais ativas que o resto da superfície, geralmente ocorre pela ação de contaminantes, como cloretos (FIGUEIREDO *et al*, 2011).

A corrosão por pite além de causar a perda de massa, pode causar danos nas propriedades mecânicas da armadura. O íon cloreto é o agente agressivo mais importante, pois ele se encontra em maiores quantidades na natureza, eles são íons pequenos e penetram com mais facilidade no filme passivador do aço. Para que aconteça a corrosão por pite, os ânions agressivos como o cloreto não são suficientes para dar início ao processo, é necessário a presença de água para ocorrer a reação de hidrólise, para evitar esse processo é importante que o revestimento evite a penetração de água (SOUSA, 2013).

A eventual presença de agentes agressivos, como os íons de cloreto, também altera os produtos da corrosão. Os produtos formados de natureza gelatinosa, solúveis ou expansivos e porosos, denominados comumente de ferrugem, só ocorrem quando possui eletrólito, diferença de potencial do eletrodo e oxigênio (HELENE, 1993).

A transformação do ferro metálico em produto de corrosão (ferrugem) é um processo expansivo, dependendo do estado de oxidação, pode ser acompanhado de um aumento da ordem de 600% em relação ao original. Esse aumento de volume é tido como principal causa de fissurações do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Andrade e Alonso (1996), essas tensões geradas no concreto pela característica expansiva das reações de corrosão, além de fissuração, podem causar destacamento e desagregação do concreto, podendo chegar ao ponto de deixar a barra expostas ao ambiente, em alguns casos, e com o contato direto da barra com o meio ambiente o processo de degradação se acelera ainda mais. Além das características mencionadas, ainda podemos citar outras consequências como a redução da seção transversal, diminuição da resistência e ductilidade.

O processo de corrosão se inicia pelo transporte de agentes agressivos para o interior do concreto, por esse motivo entendemos que há uma relação direta da agressividade do ambiente com o tempo que se leva para iniciar a corrosão, bem como utilização do critério de agressividade ambiental para definir o cobrimento de concreto. A NBR 6118: 2014 define quais são as classes de agressividade ambiental, serão apresentadas com mais detalhes posteriormente.

Como dito anteriormente, os danos resultantes da corrosão da armadura se manifestam na forma de expansão, fissuração e eventual lascamento do concreto de cobrimento. Além de perder o cobrimento, o concreto pode sofrer danos estruturais devido à perda de aderência entre o aço e o concreto, bem como área de seção transversal da barra (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Helene (1993), não há corrosão em concretos secos, por insuficiência de eletrólito, nem em concretos totalmente saturados pela insuficiência de oxigênio.

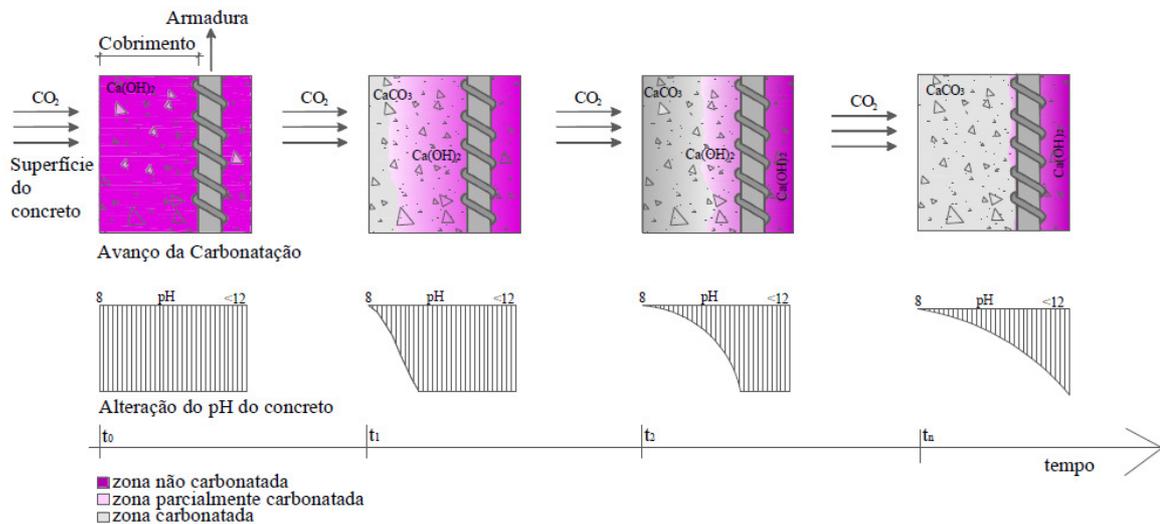
3.2 Carbonatação do concreto

O dióxido de carbono (CO_2), produto da respiração de vários seres vivos, e no caso das plantas é um elemento essencial para que ocorra a fotossíntese onde ele é consumido e liberado oxigênio. Ainda é um dos resultados, juntamente com o monóxido de carbono, da queima de combustíveis como hidrocarbonetos (gasolina, óleo) e carvão. Portanto, entendemos que os níveis de concentração no ambiente aumentam proporcionalmente aos níveis de poluição, tanto proveniente de ambientes urbanos como de ambientes industriais.

A carbonatação é tida como um dos principais fenômenos físico-químicos que pode limitar a vida útil das estruturas de concreto armado. A carbonatação reduz a alcalinidade do concreto de cobrimento e altera as condições de estabilidade química da película passivadora da armadura, criando todas as condições favoráveis para o início do processo de corrosão, conforme ilustrado na Figura 02 (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A armadura do concreto está protegida da corrosão por uma fina camada de óxido, que é formada em sua superfície devido à alta alcalinidade do concreto de cobrimento. A corrosão pode começar quando essa camada é destruída, pela penetração de cloretos ou devido à redução do pH do concreto para valores inferiores a 9. Essa redução da alcalinidade é devido a reação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, presente na massa de concreto, com o CO_2 , difundido pelos poros do concreto (PAPADAKIS et al, 1991a).

Figura 02: Representação do avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo.



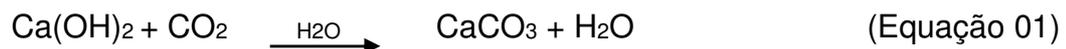
Fonte: Possan, 2010

Na Figura 02, podemos observar que a carbonatação se inicia na superfície em direção ao interior do concreto, alterando a alcalinidade e a estrutura porosa do concreto. No avanço da frente de carbonatação podemos identificar três zonas diferentes: a primeira, mais próxima à superfície, carbonatada, a segunda parcialmente carbonatada, e a terceira não carbonatada, com o pH de aproximadamente 8,3, 10 e $>12,5$, respectivamente (POSSAN, 2010).

Ainda segundo Possan (2010), no tempo t_0 o concreto se encontra com pH original, alcalino, sem zona carbonatada, já nos tempos t_1 e t_2 , com o ingresso do CO_2 através do concreto, a reação desse gás com o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que está presente na matriz da pasta de cimento, ocorre a formação do carbonato de cálcio CaCO_3 e a consequente redução do pH do concreto. Quando esse processo atingir o limite da armadura do concreto (t_n), podemos dizer que a armadura se encontra despassivada e suscetível ao processo de corrosão.

Geralmente, a frente de carbonatação é medida com a aplicação de indicadores de pH, como a fenolftaleína, timolftaleína ou amarelo de alizarina, borrifados no concreto de cobrimento. Esses indicadores se tratam de substâncias químicas, que quando entram em contato com solução alcalina do concreto, adquirem uma coloração típica de acordo com uma faixa determinada de pH, tratando-se de um método colorimétrico. No caso específico na fenolftaleína, que foi a substância utilizada para realizar os ensaios desse estudo, ela adquire uma coloração vermelha carmim, quando em contato com pHs iguais ou superiores a uma faixa entre 8,0 e 9,8, aproximadamente (CASCUDO *et al*, 2011).

Como dito anteriormente, um dos principais fatores de proteção da armadura, é a alcalinidade presente no concreto. A carbonatação consiste na penetração do CO_2 pelo concreto e a sua interação com a umidade presente nele, que resulta na diminuição do pH, em um processo de neutralização, o tornando ácido. O hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é um dos elementos resultantes da hidratação do cimento, um dos principais responsáveis pela alcalinidade do concreto, quando em contato com o CO_2 resulta um elemento ácido, o CaCO_3 , cujo o pH é em torno de 9,4 (à temperatura ambiente), conforme descrito na Equação 1 a seguir (RIBEIRO *et al*, 2013).



A carbonatação tem algumas consequências importantes, pois alguns estudos relacionam um ganho de resistência em amostras submetidas à carbonatação, bem como a atenuação do processo de carbonatação em si (o processo começa com uma velocidade alta, mas diminui com o passar do tempo), dificultando o acesso do CO_2 , e isso se explica devido à transformação do Ca(OH)_2 em CaCO_3 , esse produto do próprio processo de carbonatação, colmata e preenche os poros superficiais, pois é mais volumoso. Quando esse processo ocorre mais intensamente, devido às concentrações muito altas de CO_2 , se observa um efeito reverso, com formação de poros mais grosseiros, e conseqüente diminuição da resistência e facilitação da penetração, não só de CO_2 , como também de outros agentes agressivos (CASCUDO *et al.*,2011).

Ainda segundo Cascudo et al. (2011), recentemente na Europa foi implantado um conjunto de normas - EN 1504 - que dão uma nova abordagem à proteção e reparo de estruturas de concreto, a parte 9 dessa norma define bases gerais para uso de produtos e sistemas de reparo e proteção, que contém 11 princípios. O princípio 7 trata sobre a restauração da passividade das armaduras, criando novas condições químicas para a superfície da armadura se manter passiva ou voltar a condição de passividade. Visando que a frente de carbonatação não atinja a armadura. E existem algumas medidas que podem ser tomadas, como utilização de produtos de películas superficiais (tintas e vernizes) e argamassas cimentícias modificadas, esses produtos caracterizam-se por apresentar elevados coeficientes de resistência à penetração de CO_2 , e essa informação é muito importante para a análise de resultados desse estudo.

Segundo Tuutti (1982), a equação mais antiga para se calcular a frente de carbonatação é a Equação 02 apresentada abaixo:

$$e_c = K\sqrt{t} \quad \text{(Equação 02)}$$

Onde:

e_c : é a espessura carbonatada em mm;

t: tempo em ano ou meses;

K: depende da difusividade efetiva do CO₂ através do concreto

K é uma constante que o valor pode ser determinado quando o valor da espessura da capa carbonatada e a idade da estrutura são conhecidas. Depois de conhecido o valor de K, podemos estimar a velocidade do avanço da frente de carbonatação (ANDRADE, 1992). Segundo Neville (1997) K é o de coeficiente de carbonatação, medido em mm/ano^{0,5}.

Muitos autores definem valores críticos de pH entre 11,5 e 11,8, e abaixo desses valores não pode ser assegurada a passivação do aço, embora não seja um número cabalístico, pois já foi registrado, sob condições específicas, valores inferiores de pH sem diagnóstico da quebra da passivação. O fenômeno da carbonatação descaracteriza o filme passivador, e o aço corrói de forma generalizada, como se ele estivesse diretamente exposto ao ar livre, porém com um agravante de que a umidade permanece aprisionada no concreto e em contato com a armadura por muito mais tempo do que se tivesse exposto ao ar, pois o concreto absorve a umidade, mas não a libera com a mesma facilidade (CASCUDO *et al*, 2011).

Após a carbonatação, devido à redução dos poros, o concreto está constantemente úmido, isso se dá pois a facilidade com que o concreto absorve a água é muito diferente na velocidade que ele libera a umidade para o ambiente, sendo assim, ela fica retida (ANDRADE, 1992).

Na carbonatação existe uma característica que é uma “frente” de avanço do processo, que separa claramente duas zonas diferentes: uma com o pH em torno de 9, ou menor (carbonatada) e outra com o pH por volta de 12 (não carbonatada). Ela é conhecida como *frente de carbonatação* e deve sempre ser relacionada com o concreto de cobertura, pois essa frente não deve atingir a armadura (CASCUDO *et al.*,2011).

3.3 Fatores que influenciam a carbonatação

Nesse item serão abordados os fatores que influenciam na profundidade de carbonatação, direta ou indiretamente.

3.3.1. Meio Ambiente

Sabe-se que as condições do ambiente em que se encontram as estruturas de concreto tem grande influência no processo de carbonatação. A seguir serão apresentados separadamente os fatores.

- Concentração de CO₂

Segundo Pauletti (2004) o CO₂ é proveniente, principalmente, de processos industriais que usam combustíveis fósseis e processos de exaustão de veículos motorizados, de forma geral. Ambientes industriais, ou urbanos com grande quantidade de veículos, são ambientes em que se observa uma maior concentração de CO₂. Por um princípio simples de difusão, onde as moléculas tendem a ir de um local de maior concentração, para um de menor concentração, buscando o equilíbrio, e outros fatores que serão abordados posteriormente, como a permeabilidade que facilita a entrada do CO₂ pelo concreto, o processo de carbonatação se inicia. A Tabela 01 apresenta concentrações de CO₂ usuais para diferentes ambientes.

Tabela 01 – Concentrações de CO₂ usuais

Campo aberto	0,02%
Centro urbano	0,04%
Zona industrial	0,05%
Estábulo ventilado	0,05%
Estábulo	0,08%
Exaustão veículo motorizado	16,69%
Respiração humana	3,62%

Fonte: Sietta e Vitaliani 2004 *apud* Pauletti, 2004

Cascudo et al. (2011) ainda reforça explicando que, em uma mesma estrutura podemos observar regiões específicas com carbonatação mais intensa que no restante da estrutura. Isso acontece principalmente em garagens de edifícios, pois costumam ser ambientes confinados, de pouca ventilação, o resultado é uma atmosfera geralmente com maiores concentrações de CO₂ em relação ao demais locais do edifício.

Se tratando de concentração de CO₂, também podemos observar grandes variações em ambientes fechados, e ambientes abertos. Geralmente se observa uma carbonatação maior em ambientes fechados, onde se verifica o acúmulo de CO₂, liberados por seres humanos, máquinas em funcionamento e veículos, o que não ocorre em ambientes abertos, pois o ar se renova constantemente (KAZMIERCZAK, 1995 *apud* PAULETTI, 2004).

Possan (2010) reuniu o teor de CO₂ de alguns tipos de ambientes determinados por diferentes pesquisadores na Tabela 02:

Tabela 02: teor de CO₂ de alguns ambientes

Local	Teor médio (%)	Pesquisador
Ambiente normal*	0,033	Da Silva (1998)
Ambiente normal*	0,030 a 0,050	Papadakis et al. (1989)
Campo Aberto	0,015	Saetta e Vitaliani (2004)
Estábulo	0,075	Saetta e Vitaliani (2004)
Estábulo ventilado	0,046	Saetta e Vitaliani (2004)
Laboratório não ventilado	> 0,100	Neville (1997)
Laboratório (sala climatizada)	0,088	Pauletti (2009)
Túneis	0,100 a 0,300	Parrot (1987)
Zona industrial	0,045	Saetta e Vitaliani (2004)
Zona rural	0,030 a 0,050	Helene (1993)
Zona rural	0,035%	Papadakis e Efstathiou (2006)
Zona rural	0,030	Neville (1997)
Zona rural	0,0325	Schiessl (1976)
Zona rural	0,03	Khunthongkeaw, et al. (2006)
Zona rural	0,033	Tuutti (1982)
Zona urbana	0,036	Saetta e Vitaliani (2004)
Zona urbana	0,100	Tuutti (1982)
Zona urbana	0,08	Papadakis e Efstathiou (2006)
Zona urbana	0,006	Khunthongkeaw, et al. (2006)
Zona urbana, grandes centros	0,100	Schiessl (1976)
Zona urbana, grandes cidades	0,300	Neville (1997)
Zona urbana, Madrid, Espanha	0,033 a 0,058	Da Silva (1998)
Zona urbana, margens do rio Rin, Alemanha	0,0434 a 0,0542	Schiessl (1976)
Zona urbana, região de Munich, Alemanha	0,0325 a 0,0434	Schiessl (1976)
Zona urbana, tráfego intenso	0,1 a 1,20	Helene (1993)
Zona Urbana, Grande Porto Alegre, RS	0,063	Pauletti (2009)
Zonas agressivas	1,000	Tuutti (1982)

Fonte: Possan, 2010

- Umidade

Para a reação da carbonatação acontecer de fato, é necessário que haja água suficiente nos poros para primeiramente dissolver os compostos hidratados, ao passo que, se o teor de água for muito baixo (umidade relativa menor que cerca de 40%), não haverá dissolução. O processo também fica mais lento se os poros estiverem preenchidos com água (saturados), portanto se observa uma carbonatação máxima com umidade relativa intermediária, de forma geral, não há consenso no meio técnico a respeito da umidade relativa ideal para ocorrência da carbonatação, os valores indicados estão entre 40 e 85%. (PARROTT, 1986 *apud* PAULETTI, 2004)

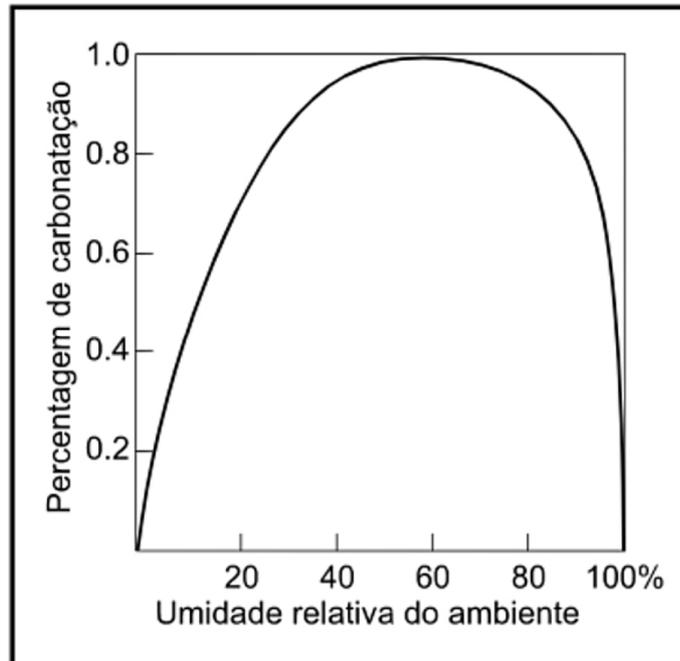
A água possui um papel muito importante na carbonatação do concreto, pois com exceção do processo de difusão, que ocorre na fase gasosa, todos os outros processos de reação envolvidos ocorrem nos poros preenchido com água. A água desempenha um papel duplo, pois ao mesmo tempo em que ela preenche os poros, dificultando a difusão do CO₂, é o meio para acontecer a reação entre o CO₂ e o Ca(OH)₂ (PAULETTI, 2004).

A difusão de CO₂ é inversamente proporcional à umidade no concreto, à medida que aumenta a umidade, diminui a difusão entre os poros. Quanto maior a umidade relativa, a fração de poros cheios de água também aumentam, o que dificulta a difusão do CO₂, diminuindo assim a velocidade de carbonatação. (PAPADAKIS et al, 1991a)

Um fator a ser levado em conta são as dimensões dos elementos, porque a umidade liberada pelas reações de carbonatação tendem a sofrer difusão para manter o equilíbrio higroscópico entre o interior do concreto e o ambiente externo. Se por algum motivo essa difusão se tornar lenta, a pressão de vapor dentro do concreto vai aumentar até a saturação, e a difusão de CO₂ para dentro do concreto vai ser praticamente interrompida. (NEVILLE, 1997)

Na Figura 03 abaixo podemos observar com mais clareza em qual faixa de umidade acontecem as maiores percentagens de carbonatação:

Figura 03: Grau de carbonatação em relação a umidade relativa do ambiente



Fonte: Cascudo et al., 2011

- Temperatura

A influência da temperatura tende a ser ignorada no processo de degradação do concreto, pois por si só é um parâmetro que indica pouca informação, porém sabemos que é um fator relevante, uma vez que as reações químicas de degradação são aceleradas com o aumento de temperatura (LIMA, 2011).

O aumento da temperatura em 10°C dobra a velocidade das reações. De maneira geral isso significa que ambientes tropicais são considerados mais agressivos do que regiões com climas amenos ou de baixas temperaturas. (GEHO, 1993, apud LIMA, 2011)

A temperatura também é importante por aumentar a mobilidade das moléculas, ou seja, o transporte de substâncias é facilitado. Geralmente, o aumento da temperatura também aumenta a solubilidade de várias substâncias. Em temperaturas muito baixas, os líquidos se congelam e impedem o transporte. (TUUTTI, 1982)

No caso específico da carbonatação, para temperaturas compreendidas entre 20 e 40 °C (PAPADAKIS et al, 1991b), que é a realidade de média de temperatura em grande parte do Brasil, não tem influência no processo, pois a difusão é o principal processo envolvido na carbonatação.

Por outro lado, mesmo no caso da carbonatação, a temperatura ser considerado um fator de pouca influência no processo, não podemos desprezá-la, porque na taxa de corrosão da armadura ela possui grande influência. (PAULETTI, 2004)

3.3.2 Fatores relacionados ao concreto

Segundo Cascudo et al (2011), as características do concreto ligadas à porosidade são determinantes para proteção desse concreto contra os agentes agressivos, como também na facilidade que o CO₂ se transporta pelo interior do concreto. Portanto, todas características que se referem à dosagem e composição do concreto, como relação água/ cimento, tipo de cimento, adições minerais, entre outros, são fatores que influenciam diretamente no sistema de poros do concreto, como também na “reserva alcalina” (quantidade de Ca(OH)₂ disponível na solução intersticial).

- Adições

Helene (1993) explica que, adições no concreto, de maneira geral, reduzem a permeabilidade, a porosidade do concreto e aumentam a resistência à compressão, etc., porém, simultaneamente se observa um aumento da velocidade de avanço da frente de carbonatação e isso pode ser explicado pela reserva alcalina, que foi citada anteriormente. O autor explica que, à medida que na solução intersticial do concreto há uma maior quantidade de Ca(OH)_2 , o CO_2 não irá penetrar com a mesma velocidade, pois primeiramente necessita reduzir o pH, e depois reagir com o hidróxido de cálcio presente, e só então seguir penetrando e precipitando o carbonato de cálcio pelo concreto.

Quando consideramos a carbonatação isoladamente, os registros científicos indicam que cimentos com adição tendem a carbonatar mais, porém para fins de corrosão causada por carbonatação, foi percebido que o refinamento dos poros através de adição pode ter um impacto positivo. (PAULETTI, 2004)

Segundo Pauletti (2004) enfatiza que, com relação às adições, a frente de carbonatação depende da forma e da quantidade de adição. As adições devem ser avaliadas cuidadosamente, pois embora geralmente se considere que elas aumentem a carbonatação, elas melhoram a compacidade do concreto, dificultando a penetração de líquidos, gases e íons. Esses fatores também devem ser levados em consideração na tomada de decisões em relação ao emprego ou não de adições. Mesmo que haja aumento na profundidade de carbonatação, esse fato não pode ser levado em consideração individualmente, pois ela não é prejudicial por si só, no balanço final, os benefícios pode se sobressair aos prejuízos, se avaliarmos o efeito dessas adições na durabilidade do concreto.

- Cura

Esse é um aspecto muito importante no que diz respeito à qualificação da pasta de cimento, pois um processo de cura adequado, não permite rápida evaporação da água de amassamento do concreto nas primeiras idades (entre 30 minutos e 6 horas), evitando ou minimizando a retração plástica e as fissuras consequentes desse processo. A cura também aumenta a hidratação da pasta de cimento na superfície do concreto, assim diminuindo a sua porosidade (CASCUDO et. al, 2011).

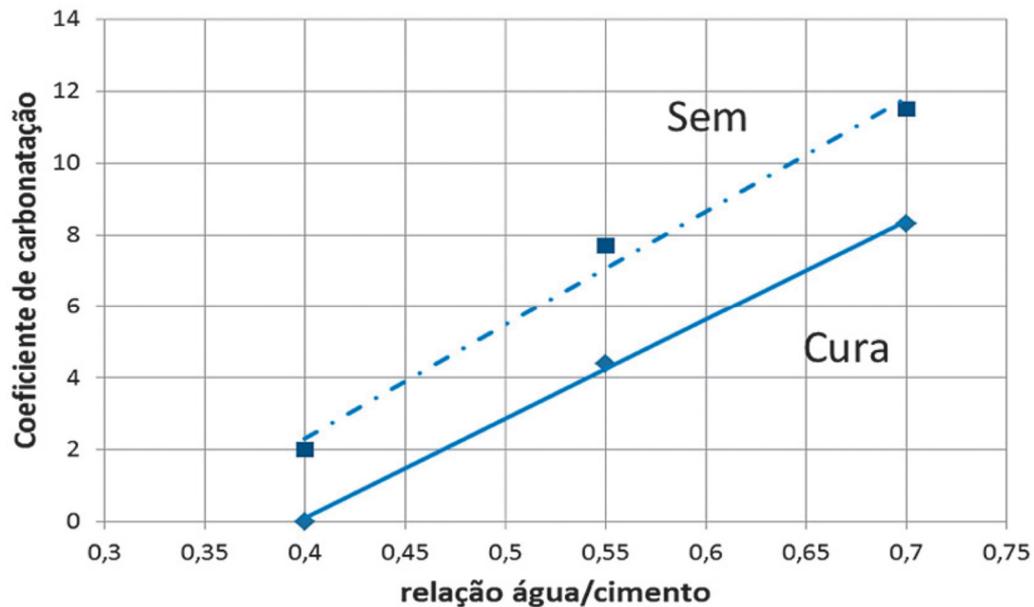
A profundidade de carbonatação depende diretamente da cura, pois a hidratação afeta nos primeiros milímetros superficiais do concreto, e cimentos com adições podem diminuir a carbonatação, desde que tenha uma cura boa e prolongada (HELENE, 1993).

Uma argamassa curada por 2 dias, pode ter até o dobro da porosidade de outra curada por 28 dias. O efeito de uma cura não adequada pode ser desastroso para a resistência nas primeiras idades, principalmente para amostras de pequenas dimensões (SMOLCZYK, 1976 apud PAULETTI, 2004).

Foi possível se observar por pesquisas anteriores que, uma cura bem feita e por tempo prolongado, é um dos fatores determinantes para diminuir a porosidade na camada mais superficial do concreto. Também podemos observar que os resultados foram melhores quando realizada a cura úmida ou submersa, por apresentarem melhores condições de hidratação do cimento, e portanto, poros mais fechados. (PAULETTI, 2004)

Na Figura 04 abaixo podemos observar a relação água/cimento e a cura para fins de carbonatação, evidenciando coeficientes de carbonatação mais baixos para uma cura efetiva, também observamos uma evolução linear dos mesmos coeficientes, quando alterada a relação a/c.

Figura 04: Influência da cura e da água/ cimento na carbonatação do concreto obtida por procedimento acelerado em concretos produzidos com cimento CP II F- 32



Fonte: Cascudo et al, 2011

- Relação a/c

A relação água/cimento tem grande importância no processo de carbonatação, pois influencia diretamente na porosidade e permeabilidade do concreto. A relação água/ cimento, controla todas as propriedades relacionadas a microestrutura do concreto endurecido. Quanto menor essa relação, menor a dimensão dos poros capilares e, conseqüentemente, mais difícil a difusão do CO₂ pelo concreto (HELENE, 1993).

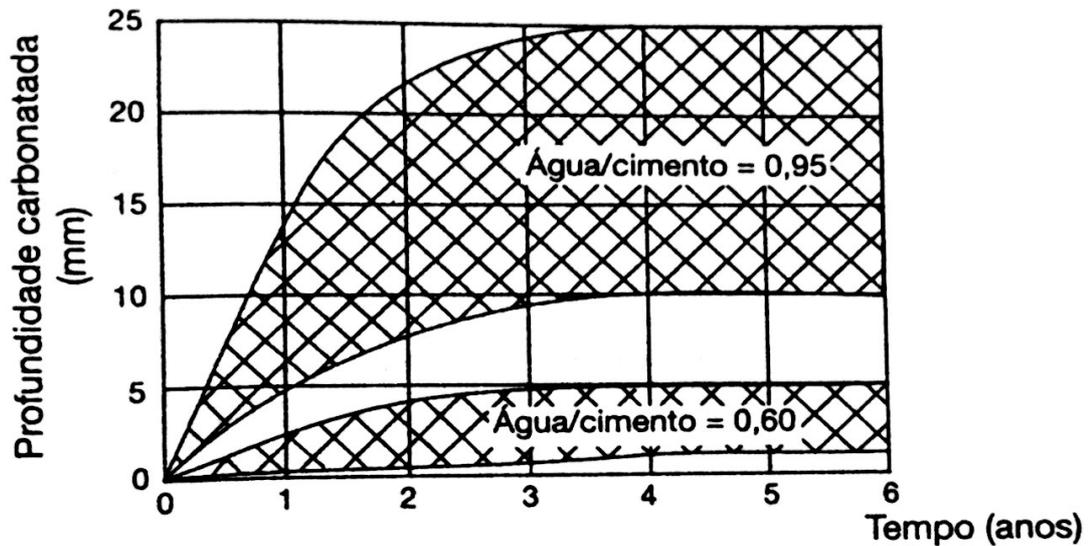
Quanto maior a relação a/c (ou relação a/agl) do concreto, maior a profundidade de carbonatação. Essa relação influencia diretamente tanto na dimensão dos poros, quanto na quantidade e conectividade (CASCUDO et al, 2011).

Quando aumentamos a relação a/c de 0,4 para 0,8, podemos observar aumento no volume dos poros em até 5 vezes e o coeficiente de difusão do CO₂ tem aumento de mais de 10 vezes. (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

Segundo Helene (1993), para mesmas condições ambientais e de cura, o que vai controlar a carbonatação é a qualidade da pasta, que é função da relação a/c e quantidade de Ca(OH)_2 na solução intersticial, (que depende do tipo de cimento).

Na Figura 05 podemos observar a relação a/c e a profundidade de carbonatação, ao longo dos anos:

Figura 05: Variação da profundidade de carbonatação em função do tempo e da relação água/ cimento.



Fonte: Ribeiro et al, 2013

3.4 Durabilidade e vida útil de estruturas

Vários documentos internacionais, nos últimos 20 anos, têm contribuído para introduzir e consolidar os novos conceitos em defesa da durabilidade e aumento da vida útil de estruturas de concreto, entre eles podemos citar:

- CEB-FIP Model Code 90
- Fib Model Code 2010
- Fib (CEB-FIP) Model Code 2006 for Service Life Design
- ACI 201 1R-208
- ACI 365 1R 00
- Norma Européia EN-206
- ABNT NBR 12655: 2006
- Norma CETESB L1 007

É importante definir e distinguir os termos de durabilidade e vida útil, apesar de muitas vezes serem utilizados como sinônimos, eles possuem grande associação, porém diferenças conceituais. O termo “deterioração” é o antônimo de “durabilidade”, significa a perda da capacidade do material de suportar as condições para as quais foi concebido originalmente, ao longo de um período determinado (RIBEIRO, 2013).

Uma vida útil longa é considerada sinônimo de durabilidade, porém é entendido que durabilidade sob um conjunto de condições não significa necessariamente durabilidade sob um outro. De acordo com ACI Commitee 201, durabilidade do concreto de cimento Portland é a sua capacidade de resistir à ação de intempéries, químico, abrasivo, ou qualquer outro tipo de deterioração, ou seja, um concreto durável preserva sua forma, qualidade e capacidade de uso original quando exposto ao ambiente para o qual foi projetado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo a NBR 6118:2014, durabilidade é a capacidade da estrutura em resistir às influências previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto, essa norma determina que as estruturas de concreto armado devem ser projetadas e construídas de modo que, sob condições ambientais previstas, conservem a segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil, estabelecida pelo contratante.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), nenhum material é propriamente durável. Conforme ocorre interação com o ambiente, a sua microestrutura, e conseqüentemente as suas propriedades, mudam com o tempo. A vida útil de um determinado material acaba quando suas propriedades estiverem deterioradas de tal forma que a continuação da sua utilização se torna insegura e antieconômica.

Com a evolução da construção civil, podemos observar aperfeiçoamento dos sistemas construtivos e dos métodos de cálculo, ao mesmo tempo que esses avanços permitiram maiores produtividades e menores custos, também foram responsáveis pelo aumento da esbelteza das estruturas, redução do cobrimento de armadura e conseqüente aumento das tensões de trabalho, esses fatores citados foram decisivos para visível diminuição na durabilidade das estruturas (RIBEIRO, 2013).

Nos últimos anos temos observado uma nítida evolução no estudo da durabilidade de estruturas de concreto armado e protendido, principalmente pelo fato dos pesquisadores terem adquirido maiores conhecimentos no que diz respeito aos mecanismos de transporte de líquidos e gases agressivos nos meios porosos, como concreto, e isso possibilitou a associação de tempo aos modelos matemáticos, que expressam quantitativamente esses mecanismos (MEDEIROS et al., 2011).

Tendo em vista que a maior parte das construções das principais metrópoles brasileiras foram realizadas nas décadas de 1970 e 1980, elas estão completando entre 30 e 40 anos de idade, idade na qual os gastos com manutenção se tornam mais constantes. Por esse motivo é de total importância levar o conhecimento adquirido pelas instituições de pesquisa ao setor construtivo. Há uma grande dificuldade em relação à essa aproximação, pois a indústria da construção civil é tida como uma das mais conservadoras e menos abertas às inovações, principalmente quando elas trazem impactos econômicos em cadeia. É importante observar que gastos com manutenção e reparo, que consomem uma parte significativa dos orçamentos dos países, podem ser atenuados, além de se evitar perda de vidas de valor inestimável, por falhas nos materiais. (RIBEIRO,2013)

Recentemente a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na NBR 6118: 2007 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento), dedicou dois capítulos para abordar a durabilidade de estruturas, e definiu os parâmetros de projeto, em função da agressividade do meio.

Segundo Medeiros et al (2011), o conhecimento, durabilidade e métodos de previsão de vida útil são importantes para:

- Auxiliar na previsão do comportamento do concreto ao longo prazo;
- Prevenir manifestações patológicas precoces na estrutura;
- Contribuir para economia, sustentabilidade e durabilidade das estruturas.

A seguir são apresentados os diferentes conceitos para vida útil, de acordo com Helene (1997) e que se encontram ilustradas na Figura 05.

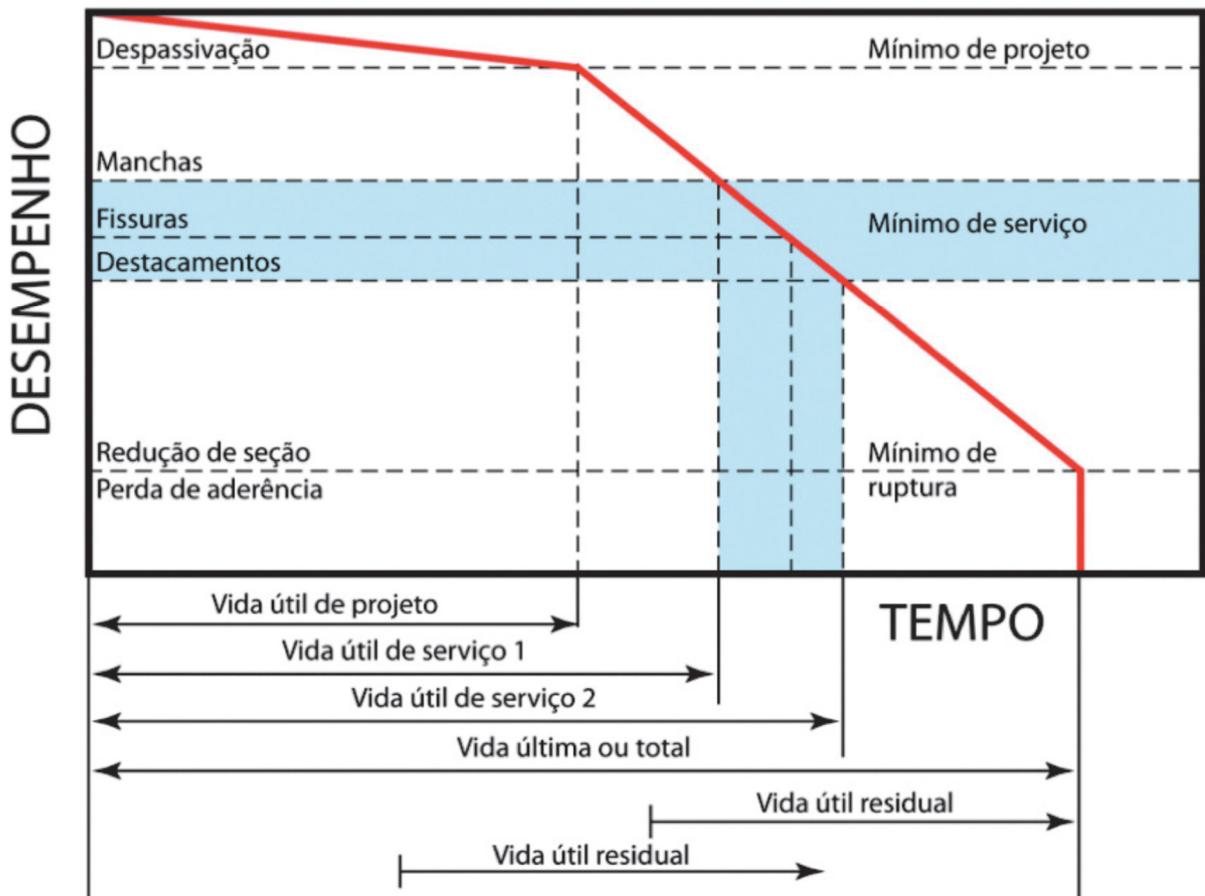
Vida útil de projeto: período de tempo até a armadura ser despassivada, também chamado de período de iniciação. É o tempo necessário para que a frente de carbonatação ou a frente de cloretos atinja a armadura. Não necessariamente a partir desse momento de despassivação da armadura, haverá um processo de corrosão importante, mas no geral ela ocorre, portanto esse é o período de tempo que adotamos no projeto de estrutura, a favor da segurança estrutural.

Vida útil de serviço: tempo que leva até que apareçam manchas na superfície do concreto, ou ocorram fissuras no concreto de cobertura, ou ainda quando há destacamento do concreto de cobertura. Esse tempo é variável de uma estrutura para outra, pois depende das exigências feitas ao uso da estrutura. Em algumas situações é inadmissível que estruturas apresentem manchas e fissuras, enquanto em outras somente o início do deslocamento do concreto pode definir o momento a partir do qual se deve considerar terminada a vida útil de serviço.

Vida útil última ou total: período de tempo que leva até a ruptura, ou colapso total ou parcial da estrutura. É caracterizado por haver uma redução significativa na seção transversal do aço, ou uma perda importante de aderência armadura/ concreto, podendo ocasionar o colapso total ou parcial da estrutura.

Vida útil residual: corresponde ao tempo em que a estrutura ainda será capaz de desempenhar suas funções, nesse caso contando a partir de uma data qualquer, de acordo com uma vistoria. Essa vistoria e diagnóstico podem ser feitos a qualquer momento, em qualquer uma das fases de vida em uso da estrutura. O prazo final pode ser tanto o limite de projeto, o limite das condições de serviço, quanto o limite de ruptura, possibilitando assim até três possíveis vidas úteis residuais, uma mais curta até a despassivação da armadura, outra até o aparecimento de manchas, fissuras ou destacamento do concreto de cobertura, e uma mais longa até perda significativa da capacidade resistente da estrutura, ou seu eventual colapso.

Figura 06: Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão de armaduras.



Fonte: Helene, 1997

Um dos aspectos mais importantes relacionados à durabilidade de uma estrutura, mantidas demais condições, é a classificação da agressividade ambiental. Existem classificações normativas de agressividade ambiental, de acordo com a NBR 6118:2014, mostradas no Tabela 03:

Tabela 03: Classes de agressividade ambiental.

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 micro-clima com classe de agressividade um nível mais branda 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 um nível mais branda em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuvas 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: 2014

A NBR 6118 (ABNT, 2014), enfatiza também outros aspectos de grande importância para a durabilidade da estrutura, como relação a/c, já explicada anteriormente nesse estudo, e a espessura do concreto de cobertura, e indica condições mínimas para esses aspectos, relacionando-os com a classe de agressividade mostrada no quadro acima, o Tabela 04 abaixo mostra a relação a/c, e o Tabela 05 mostra o concreto de cobertura.

Tabela 04: Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e a qualidade do concreto.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

NOTAS:

- O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na NBR 12655.
- CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.
- CP Componentes a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 6118: 2014

Tabela 05: Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c=10\text{mm}$

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ³⁾
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55

1. Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

2. Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos, e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas pelo item 7.4.7.5 respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

3. Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6118: 2003, p.20

Uma importante diretriz no que diz respeito à durabilidade da estrutura de concreto é determinada por quatro fatores, indicados por Helene (1993) como regra dos 4C:

- Composição ou traço de cimento;
- Compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura;
- Cura efetiva do concreto na estrutura e;
- Cobrimento ou espessura do concreto de cobrimento das armaduras.

Entende-se que a durabilidade do concreto deve ser levada em consideração desde a fase de concepção de um projeto estrutural, para tal, deve-se verificar uma série de fatores intervenientes no processo de degradação do concreto, abordados anteriormente, para que se possa atingir a vida útil de estrutura desejada.

3.5 Métodos de previsão de vida útil

Com a intenção de compreender melhor os mecanismos de degradação, alguns calculistas criaram modelos de previsão de vida útil. Segundo Levy et al. (2004) a previsão pode ser efetuada através de 4 procedimentos:

- Com base nas experiências anteriores;
- Com base em ensaios acelerados;
- Com base em enfoque determinista;
- Com base em enfoque estocástico ou probabilista.

Apesar de existirem vários modelos de previsão de vida útil de estruturas de concreto armado, é necessário a validação desses modelos a partir de comparações com resultados de campo, e os resultados de campo são muito demorados, pois envolvem monitoramento de estruturas em condições reais de utilização, que possuem degradação lenta (MEDEIROS *et al.*, 2011).

3.5.1 Método com base nas experiências anteriores

Segundo Possan (2010), o método com base nas experiências anteriores, trata-se de um método que acumula o conhecimento empírico e heurístico na área, ou seja, apenas com experiências adquiridas tanto em campo, como em laboratório. Foi a primeira tentativa de assegurar um nível mínimo de desempenho nas estruturas, esse método adota medidas recomendáveis para o desempenho aceitável de uma estrutura, considerando a resistência dos materiais e os esforços solicitantes.

A primeira norma Brasileira sobre estruturas de concreto, publicada pela Associação Brasileira de Concreto (ABC), em 1931, mesmo sendo mais completa em relação à norma Americana de 1910, ela foi muito mais ousada, permitindo espessuras de concreto de cobrimento bem inferiores, não levando em consideração a agressividade do ambiente. Hoje, depois de presenciado as consequências das definições feitas na época, e tendo observado perda precoce da vida útil de diversas edificações, podemos afirmar que a norma foi irresponsável (MEDEIROS *et al.*, 2011).

O mesmo autor explica que o texto da norma mais recente sobre essas definições, NBR 6118: 2007, ainda adota esse método como a principal ferramenta, ainda que existam métodos muito mais avançados a respeito, porém a norma brasileira não está sozinha, porque os textos normativos importantes como: *Eurocode II* e o *ACI 318*, ainda adotam o mesmo procedimento ultrapassado para assegurar a durabilidade. Os três textos normativos citados, mesmo que apresentem tabelas indicando cobrimento mínimo, qualidade do concreto de cobrimento, relação a/c, nitidamente mais complexos que os documentos do início do século XX, mas com os mesmos conceitos ultrapassados e retrógrados de mais de cem anos atrás, sendo até ineficientes em alguns casos.

3.5.2 Método com base nos ensaios acelerados

Possan, 2010, descreve que, esse método consiste na realização de ensaios acelerados de durabilidade, procurando determinar um fator de relação desta durabilidade com a evolução dos danos observados em condições reais de degradação. Essa relação é chamada de coeficiente de aceleração e “é adimensional e expressa o número de vezes que o ensaio acelerado representa a degradação natural, sendo relativo aos concretos estudados e às condições de exposição impostas nos dois procedimentos de ensaio” (POSSAN, 2004).

Segundo MEDEIROS et al., 2011, esse método foi introduzido pelos Americanos em 1978, na primeira norma ASTM E 632. Esses ensaios de degradação acelerada podem ser utilizados para se estimar a vida útil do concreto, porém esse mecanismo não é fiel às condições de degradação reais. Se a degradação avança de forma igual, porém apenas em velocidades diferentes, então podemos determinar um coeficiente de aceleração **K**.

$$K = \frac{T_{ea}}{T_{cr}} \quad (\text{Equação 03})$$

Em que:

T_{ea} : taxa de degradação pelo ensaio acelerado;

T_{cr} : taxa de degradação em condições reais.

A grande dificuldade dos ensaios acelerados é a falta de dados de desempenho em uso de longo prazo de estruturas de concreto para determinar adequadamente o T_{cr} .

O processo de carbonatação tem diversos fatores intervenientes, principalmente os que dizem respeito às condições de execução de ensaio e de exposição natural, por esse motivo há uma grande dificuldade em se obter esses coeficientes. Ainda há a carência de definições normativas em relação a esses procedimentos, para que possam ser realizados de forma padronizada (POSSAN, 2004).

3.5.3 Método com enfoque determinista

Esse método considera que a qualidade do concreto é o caminho que o agente agressivo percorre até chegar a armadura e dar início ao processo de degradação. Para tanto se baseia nos mecanismos de transporte de gases, massa e íons através dos poros do concreto, descritos na Lei de Faraday, equação de Darcy, primeira e segunda leis de Fick, entre outros (POSSAN, 2010).

A base científica desse método são os mecanismos de transporte de gases, de íons e de fluidos através dos poros do concreto. Existem dois modelos que serão abordados: modelo de previsão até despassivar e modelo de previsão após despassivar (MEDEIROS *et al.*, 2011).

- Modelo de previsão até despassivar – Termodinâmica da corrosão

De acordo com Medeiros *et al* (2011) é um modelo baseado nos 4 principais mecanismos de transporte de massa através do concreto:

- Permeabilidade – equação de Darcy e de Arrhenius;
- Absorção capilar – equação de Darcy modificada e eq. de Laplace e eq. de Arrhenius;
- Difusão de gases e íons – equação de Arrhenius e eq. de Fick, 1ª e 2ª, e eq. de Langmuir.
- Migração de íons – equação de Nernst- Planck e eq. de Arrhenius e eq. de Fick, 1ª e 2ª e eq. de Langmuir.
- Modelo de previsão após despassivar – Cinética da corrosão

Medeiros *et al* (2011), afirma que, esse método se baseia nos seguintes mecanismos:

- Mecanismos de perda de massa no aço – equação de Faraday;
- Mecanismos de difusão da ferrugem – equações de Fick;
- Geometria da peça – equação de resistência dos materiais.

3.5.3 Método com enfoque estocástico ou probabilista

Os pesquisadores empregaram métodos estocásticos ou probabilísticos, pois estavam cientes que o processo de produção e degradação de estruturas de concreto envolvem muitas variáveis aleatórias, esse método foi pensado para se considerar as incertezas da vida útil da estrutura. (POSSAN, 2010)

Segundo Medeiros *et al.* (2011), a aplicação das teorias do método de probabilidade se mostram muito promissoras, pois são ferramentas úteis e mais eficientes para resolver problemas com muitas variáveis incertas e aleatórias.

Em resumo, esse é o método dito como mais promissor e com maior confiabilidade por parte dos pesquisadores, pois ele consegue inserir os modelos de comportamento e as variabilidades do processo de degradação de estruturas para a determinação da vida útil. (POSSAN, 2010).

3.6 MODELOS MATEMÁTICOS

Nas últimas décadas foram elaborados uma série de modelos matemáticos para se estimar a profundidade de carbonatação (x_c), no tempo (t). Esses modelos serão apresentados no Tabela 06, entre si, eles se diferenciam quanto à forma de geração (concepção) e quanto ao número e tipos de variáveis de entrada. (POSSAN, 2010)

Tabela 06: modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação do concreto.

(Continua)

Equação	Autor (ano)	Modelo	Fatores	Observações
Equação 11	SMOLCZYK (1969)	$e_c = k \cdot \sqrt{t - t_0}$	e_c = espessura carbonatada (mm); t_0 = idade inicial da estrutura (anos); t = tempo de exposição (anos). k = coeficiente de carbonatação; n = parâmetro que depende do tipo de cimento. Para cimentos Portland comum $n \approx 1,7$. Para cimentos Portland de alto forno $n \approx 2,0$	- Considera somente dois tipos de cimento. - Não informa como determinar o k .
Equação 12	HAMADA (1969)	$e_c = \frac{R}{\sqrt{k}} \cdot t, \text{ para } k = \frac{0,30(1,15 + 3a/c)}{(ac - 0,25)^2}$	e_c = espessura carbonatada; k = coeficiente em função da a/c ; a/c = relação água/cimento; R = coeficiente tabelado. $R = r_c r_a r_s$ = função do tipo de cimento (r_c), tipo de agregado (r_a) e aditivo (r_s).	- Parâmetros do modelo são tabelados. - k é função da a/c
Equação 13	SMOLCZYK (1976)	$e_c = a \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{f_c}} - \frac{1}{\sqrt{f_{c\lim}}} \right) \sqrt{t}$	e_c = espessura carbonatada (cm); a = velocidade de carbonatação; f_c = resistência à compressão do concreto (kgf/cm^2); $f_{c\lim}$ = valor limite da resistência à compressão do concreto que pode ser carbonatada (kgf/cm^2); t = tempo de exposição (semanas). Para ambientes internos $a = 220$ e $f_{c\lim} = 920$. Para ambientes externos $a = 250$ e $f_{c\lim} = 625$.	- Não informa como determinar o coeficientes a ; - A carbonatação é função somente da resistência à compressão.
Equação 14	SCHIESSL (1976)	$e_c = \left(\frac{2 \cdot D \cdot (c_1 - c_2)}{a} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{t}$	e_c = espessura carbonatada; D = coeficiente de difusão efetiva do CO_2 (m^2/s); a = volume de material alcalino no concreto; $c_1 - c_2$ = diferença da concentração de CO_2 entre a superfície e a frente de carbonatação (kg/m^3); t = tempo de exposição.	- Parâmetros de entrada de determinação não trivial, como D , a , c_1 e c_2 ;
Equação 15	TUUTTI (1982)	$e_c = k \cdot \sqrt{t}$	e_c = espessura carbonatada (mm); t = tempo em anos ou meses; k = coeficiente dependente da difusividade efetiva do CO_2 através do concreto.	- Não informa como determinar o k para projetos novos.

Tabela 06: modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação do concreto

(Continua)

Equação	Autor (ano)	Modelo	Fatores	Observações
Equação 16	SENTLER (1984)	<p>Determinista</p> $e_c = \sqrt{\left(\frac{2 D_{CO_2}}{a}\right) dp \cdot t}$ <p>Estocástico</p> $f(e_c, e_0; t) = \left[\frac{1}{\sigma(2 \cdot \pi \cdot t^{0,5})^{0,5}} \right] \frac{(e_c - e_0 - \mu \cdot t^{0,2})^2}{2 \cdot \sigma^2 \cdot t^{0,5}}$	<p>D_{CO_2} = coeficiente de difusão de CO_2 (m^2/s);</p> <p>A = concentração dos constituintes do concreto que podem carbonatar (kg/m^3);</p> <p>Dp = diferença parcial de pressão do CO_2 (kg/m^3).</p> <p>$f(e_c)$ = função de densidade normal com média $e_0 + \mu \cdot t^{0,5}$ e variância $\sigma^2 \cdot t^{0,5}$.</p> <p>Unidade de tempo em segundos.</p> <p>e_0 = é a carbonatação mais rápida que ocorre na superfície do concreto.</p>	- Parâmetros de entrada de determinação não trivial, como D_{CO_2} , A , Dp e c_s ;
Equação 17	HO e LEWIS (1987)	$e_c = e_0 + k\sqrt{t}$	<p>e_0 = profundidade de carbonatação inicial;</p> <p>k = coeficiente de carbonatação $mm/ano^{0,5}$;</p> <p>t = tempo.</p>	- Não informa como determinar o k para projetos novos.
Equação 18	VESIKARI (1988)	$k = 26(ac - 0,3)^2 + 1,6$	<p>k = coeficiente de carbonatação ($mm/ano^{0,5}$);</p> <p>ac = água cimento;</p> <p>limites: $0,45 < ac < 0,75$.</p> <p>Para ambiente externo desprotegido, multiplicar por 4.</p>	- A carbonatação é função somente da relação a/c e é dada por um coeficiente k .
Equação 19	PAPADAKIS, VAYENAS e FARDIS (1989 e 1991a)	$e_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}[CO_2]^0}{[Ca(OH)_2]^0 + 3[CSH]^0 + 3[C_3S]^0 + 2[C_2S]^0} t}$	<p>e_c = profundidade de carbonatação (m);</p> <p>CO_2 = concentração molar do CO_2 (mol/m^3);</p> <p>D_{CO_2} = coeficiente de difusão efetivo do CO_2 no material carbonatado (m^2/s);</p> <p>t = tempo (s);</p> <p>$Ca(OH)_2$ e CSH = concentração molar dos hidratos (mol/m^3);</p> <p>C_3S e C_2S = concentração molar dos anidros (mol/m^3).</p> <p>O índice 0 é relativo às concentrações iniciais ($t=0$).</p>	- Parâmetros de entrada de determinação não trivial, como CO_2 , D_{CO_2} . - Necessidade da determinação da concentração molar dos hidratos e anidros.
Equação 20	BOB e BOB (1991) BOB E AFFANA (1993)	$e_c = 150 \left(\frac{c \cdot k \cdot d}{f_c} \right) \sqrt{t}$	<p>e_c = profundidade de carbonatação média (mm);</p> <p>f_c = resistência à compressão do concreto (MPa);</p> <p>C = coeficiente do tipo de cimento;</p> <p>k = coeficiente da umidade relativa (condições ambientais)</p> <p>d = coeficiente referente à quantidade de CO_2;</p> <p>t = tempo (anos).</p>	- Parâmetros do modelo são tabelados.

Tabela 06: modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação do concreto

(Continua)

Equação	Autor (ano)	Modelo	Fatores	Observações
Equação 21	PARROT (1994)	$e_c = 64 \frac{K^{0,4} t^n}{c^{0,5}}$ $n = 0,02536 + 0,01785 \cdot UR - 0,0001623 UR^2$	e_c = profundidade de carbonatação (m); K = permeabilidade do oxigênio no concreto para uma umidade relativa de 60% (m ² /s); c = concentração de CaO no concreto (mol/kg); n = coeficiente em função da Umidade relativa;. t = tempo (anos).	- Considera a permeabilidade do oxigênio através do concreto a concentração de CaO, parâmetros de terminação não trivial.
Equação 22	CEB 238 (1997)	$e_c = \sqrt{(2 \cdot \psi_1 \cdot \psi_2 \cdot \psi_3 \cdot \Delta c)} \cdot \sqrt{\frac{D_{nom}}{a}} \cdot t \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n$	e_c = profundidade de carbonatação (m); D_{nom} = difusão do CO ₂ (T de 20°C e UR de 65%); a = quantidade de CO ₂ para a completa carbonatação; Δc = diferença de concentração de CO ₂ entre o ambiente e a frente de carbonatação; ψ_1, ψ_2, ψ_3 = parâmetros referentes às condições de micro clima, de cura e à relação a/c; (tabela). n = parâmetro que reflete as condições micro climáticas (ciclos de molhagem e secagem); (tabela). t_0 = período de referência (1 ano); t = tempo. $n = 0$ (interiores); $n \leq 0,3$ (exteriores);	<ul style="list-style-type: none"> - Parâmetros do modelo são tabelados. - Considera os vários fatores que influenciam a carbonatação; - Parâmetros de entrada de determinação não trivial, como D_{nom}, a e c.
Equação 23	DURACRETE (1999)	$e_c = \sqrt{\frac{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot D_{eff} \cdot \Delta c}{a}} \cdot \sqrt{t} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^w$	e_c = profundidade de carbonatação (m); D_{eff} = coeficiente de difusão efetivo do CO ₂ no período de referência t_0 (m ² /s); a = quantidade de CO ₂ para a completa carbonatação (kg/m ³); Δc = diferença de concentração de CO ₂ entre o ambiente e a frente de carbonatação (mol/m ³); k_e = parâmetros referente às condições climáticas, especialmente a umidade média do concreto; (tabela) k_c = parâmetros referente às condições de cura do concreto; (tabela). w = quantidade de água contida no concreto (kg/m ³); t_0 = período de referência (1 ano); t = tempo.	<ul style="list-style-type: none"> - Parâmetros do modelo são tabelados. - Considera os vários fatores que influenciam a carbonatação; - Parâmetros de entrada de determinação não trivial, como D_{eff}, a e c.

Tabela 06: modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação do concreto

(Conclusão)

Equação	Autor (ano)	Modelo	Fatores	Observações
Equação 24	JIANG et al. (2000)	$e_c = 839 \cdot (1 - UR)^{1,1} \sqrt{\frac{W}{r_c C} - 0,34} \cdot C_0 \sqrt{f}$	<p>UR = umidade relativa; W = quantidade de água (kg/m^3); C = consumo de cimento (kg/m^3); C_0 = concentração de CO_2 (%); r_c = coeficiente que depende do tipo de cimento; (tabela). r_{hd} = coeficiente do grau de hidratação; (tabela).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Parâmetros do modelo são tabelados. - Considera os parâmetros de dosagem do concreto.
Equação 25	EHE (2008)*	$e_c = C_{amb} \cdot C_{ar} \cdot a \cdot f_{cm}^b \cdot \sqrt{f}$	<p>e_c = profundidade de carbonatação (m); f_{cm} = resistência média à compressão, em MPa c_{amb} = coeficiente de ambiente (tabelado). c_{ar} = coeficiente do ar incorporado (tabelado). a, b = Parâmetros em função do tipo de aglomerante (tabela).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Parâmetros do modelo são tabelados. - Não considera os principais fatores de influência na carbonatação.
Equação 26	HYVERT (2009)	$e_c = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{CO_2}^0 \cdot P_0 \cdot t}{R \cdot t \cdot \left(1 + \alpha \cdot C_2 \cdot \left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^n\right) \cdot \left(\frac{C_2}{n+1} \cdot \left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^n + QI\right)}}$	<p>e_c = profundidade carbonatada (m); P_0 = pressão parcial de CO_2 na superfície do material (Pa); P_{atm} = a pressão atmosférica (Pa); t = tempo (s); R = constante dos gases perfeitos ($\text{J}/\text{mol}/\text{K}$); T = temperatura (K); $D_{CO_2}^0$ = coeficiente de difusão do CO_2 na zona carbonatada para uma exposição em pressão natural de CO_2 (m^2/s) QI = número de moles de cálcio contidos nos três tipos de hidratos (a portlandita, a etringita e os aluminatos) (mol/l de pasta) α e n = parâmetros em função do tipo de cimento. α = reflete a influência sobre a difusão do CO_2, na diminuição da porosidade devida à carbonatação dos C-S-H. n = afinidade química dos C-S-H com vistas à pressão de CO_2.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Modelo complexo. - Modelagem físico-química - A maioria dos parâmetros de entrada do modelo precisam de ensaios de laboratório para sua determinação.

Fonte: HAKKINEN, 1993 apud POSSAN, 2010 – p. 93, 94, 95 e 96

4 METODOLOGIA DE TRABALHO

Neste capítulo serão detalhados os procedimentos de execução da presente pesquisa. Para realização dos ensaios de carbonatação, foram retiradas amostras do concreto de cobrimento até o encontro da armadura para a aplicação da fenolftaleína, e posterior medição da frente de carbonatação, de acordo com a indicação do método colorimétrico. Os ensaios de carbonatação ainda carecem de normas técnicas para padronização desse tipo de ensaio, ele foi realizado com base em estudos anteriores, pensado de forma que se conseguisse atingir o objetivo do trabalho.

É importante ressaltar que todos os ensaios foram efetuados em garagens, por se admitir que garagens possuem concentrações maiores de CO₂, portanto espera-se que representem situações mais críticas relacionadas à carbonatação.

4.1 Caracterização dos edifícios estudados

4.1.1 Garagem do Edifício de Águas Claras (GARAGEM A)

Trata-se de edifício residencial localizado em Águas Claras, aproximadamente à 30 km da zona central de Brasília. Vale salientar que é uma região com crescimento urbano importante nos últimos anos e em grande desenvolvimento. A construção do edifício foi iniciada em 2009, e está em funcionamento desde 2012, porém a estrutura do subsolo já possui 5 anos.

Esse prédio possui 5 níveis de garagem, o presente estudo foi realizado na garagem localizada no 5º subsolo, caracterizada por apresentar as condições mais adversas com relação a ventilação e umidade.

Os pilares não possuem revestimento argamassado, apenas pintura texturizada, Por ser tratar de um prédio recente, não foram observados sinais de corrosão na estrutura.

Esse residencial é um empreendimento de alto padrão construtivo, portanto admite-se um bom controle na qualidade da construção.

De acordo com a Figura 07 abaixo, podemos observar que se encontra numa área totalmente urbanizada, sem grandes áreas verdes arborizadas por perto.

Figura 07: Localização da Garagem de Águas Claras



Fonte: Google Maps

4.1.2 Garagem do Edifício da Asa Sul (GARAGEM B)

Esse edifício selecionado, também é residencial, localizado no bairro Asa Sul, no Plano Piloto. Pelo projeto piloto de Brasília, as superquadras têm características de grande espaçamento entre os prédios, grandes áreas abertas e verdes. Por causa do tombamento da cidade, não há possibilidade de novas construções nas proximidades. No caso específico dessa garagem, a construção dela foi feita após finalizada a construção dos prédios, com a intenção de individualizar as vagas de garagem para os moradores, então a garagem data em aproximadamente 30 anos, e os prédios que estão conectados pela garagem, datam de aproximadamente 50 anos.

Essa garagem apresenta apenas um nível, semienterrada, com abertura para o ambiente externo, ou seja, trata-se de um ambiente ventilado, com circulação de ar.

Os pilares apresentam uma camada grossa de argamassa, e por cima dela uma fina camada de pintura texturizada,

Em alguns pontos da estrutura foi possível observar sinais de corrosão, e na base de alguns pilares havia armadura exposta, com o concreto de cobrimento já destacado. De acordo com as informações passadas pelo síndico, a impermeabilização da laje de cobertura da garagem foi refeita no ano de 2013. Não é possível fazer observações sobre o controle da qualidade da construção, pois se trata de um prédio construído no início de Brasília, por volta dos anos 60, sem acesso aos projetos de estrutura e ao processo de construção. Mas vale ressaltar que os métodos construtivos da época eram diferentes dos atuais, evidenciado na grossa camada de argamassa aplicada nos pilares. Na Figura 08, podemos observar uma grande diferença para o prédio anterior, pois as superquadras são extremamente arborizadas, com grandes áreas verdes e espaços abertos.

Figura 08: Localização da garagem na 105 sul.



Fonte: Google Maps

4.1.3 Garagem do Edifício de Taguatinga (GARAGEM C)

O terceiro prédio, está localizado em Taguatinga, uma cidade satélite localizada a cerca de 35 km do centro de Brasília, trata-se de um centro urbano com crescimento desordenado, porém tem uma característica de ter muitas residências e poucos prédios, os prédios de Taguatinga são mais baixos em relação à Águas Claras e costumam compartilhar para uso comercial no térreo, e os andares de cima para uso residencial. Segundo o projeto, esse prédio data de 1983, portanto possui 31 anos.

Essa garagem está um nível abaixo da rua, mas possui abertura para área externa, portanto também possui uma boa circulação de ar, ainda que não seja tão aberto quanto a GARAGEM B e nem tão fechado quando a GARAGEM A, de Águas Claras.

Também não há informações sobre a construção do prédio, bem como acesso a projetos e à qualidade da execução da obra, pois se trata de um edifício de construção antiga. É importante ressaltar que os pilares eram revestidos por uma grossa camada de pintura texturizada.

Era possível se observar alguns sinais de infiltração nas paredes da garagem, mas não foram observadas características como destacamento de revestimento de concreto ou algum outro sinal mais evidente de corrosão de armadura.

Na Figura 09, podemos notar que o prédio está inserido em uma região urbana, sem áreas verdes e sem árvores nas proximidades.

Figura 09: Localização da garagem de Taguatinga.



Fonte: Google Maps

4.2 Descrição dos ensaios realizados

Primeiramente foi elaborada uma planilha com todos os dados que precisavam ser coletados, descritos abaixo:

- Data do ensaio;
- Horário do ensaio
- Identificação do pilar;
- Medidas da frente de carbonatação (tentamos coletar 4 medidas por furo)
- Umidade relativa do ar;
- Temperatura ambiente;
- Concentração de CO₂;
- Umidade do concreto.

Para a realização dos ensaios, foram escolhidos 3 pilares em cada uma das garagens estudadas. Contudo, na garagem C apenas dois pilares foram ensaiados totalizando 8 medidas (3+3+2). O único critério para escolha dos pilares foi que eles não deviam ser pilares muito carregados, mas de maneira geral, foram escolhidos de forma aleatória.

A primeira etapa era realizar um furo no pilar, para romper o concreto de cobertura em uma extensão pequena, para que não houvesse grandes danos à estrutura. A maior dificuldade era achar o posicionamento exato da armadura na ausência de pacômetro, por isso procurou-se realizar a medição próximo ao canto do pilar.

Após o rompimento do concreto, procedeu-se com a limpeza da superfície com um pincel para retirar o excesso de pó, e logo após esse procedimento foi borrifada solução alcoólica de fenolftaleína.

As medidas de carbonatação foram realizadas com o auxílio de um paquímetro digital, bem como a espessura do concreto de cobrimento (medida da superfície do concreto até o encontro da armadura).

Tanto a umidade do ar quanto a temperatura foram retiradas antes do início dos ensaios, As medidas de umidade e temperatura foram feitas apenas uma por garagem, pois em um mesmo ambiente não devem haver variações consideráveis.

Figura 10: Equipamento de medição de umidade relativa e temperatura



Em cada um dos pilares, foram retiradas três amostras do concreto para realizar a medição da umidade. Logo após o seu rompimento, as amostras foram armazenadas em recipientes hermeticamente fechados, e levadas até o laboratório para determinação da umidade utilizando a Equação 04 abaixo. O valor final da umidade é retirado na média entre as três amostras.

$$w\% = \frac{Ch - Cs}{Cs - T} \quad (\text{Equação 04})$$

Onde:

- $w\%$: umidade do concreto
- Ch : peso do concreto úmido, em gramas;
- Cs : peso do concreto seco, em gramas;
- T : tara da cápsula.

Para se conseguir a umidade do concreto, foram medidas em um laboratório, com uma balança de precisão, a tara das cápsulas, depois a massa do concreto úmido + cápsula e após 48 horas na estufa, foram repetidas a medição, com o concreto seco + cápsula.

Para realizar a medição de CO_2 , foi optado por contratar uma empresa especializada em qualidade do ar, foram medidas as concentrações de dióxido de carbono de todas as garagens em um dia diferente dos dias em que foram realizados os ensaios, pois entendemos que a concentração de CO_2 não sofre grandes variações em um curto espaço de tempo, principalmente porque a carbonatação é um processo que ocorre a longo prazo.

Figura 11 : Equipamento de medição de dióxido de carbono (CO₂)



5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Condições ambientais

A Tabela 07 apresenta os dados climáticos, como temperatura máxima, mínima e umidade relativa do ar para a cidade de Brasília. Nota-se que as temperaturas variam de 14,1°C em julho a 29,1°C em setembro. Já a umidade relativa do ar fica entre 42 a 76%, de acordo com as médias dos últimos 10 anos obtidos pelo Inmet.

Tabela 07: Dados climáticos de Brasília

Dados climáticos de Brasília												
Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura máxima média (°C)	26,8	27,1	27,0	26,7	26,1	25,2	25,7	27,5	29,1	28,9	27,0	26,6
Temperatura mínima média (°C)	18,5	18,3	18,3	17,7	15,6	14,2	14,1	15,6	17,7	18,6	18,2	18,3
Umidade relativa do ar (%)	76	75	76	71	63	57	50	42	44	60	74	76
Número de dias com chuva	21	18	18	10	4	1	1	2	5	15	19	23
Precipitação mensal total (mm)	207	211	210	145	20	2	2	25	31	170	226	284
Notas:	1. A temperatura mínima chega a 9°C nos meses de maio e julho. 2. A umidade relativa do ar chega a valores críticos de 15% nos meses de junho e julho. 3. Média dos últimos 10 anos.											
Fonte:	INMET											

Fonte: INMET

Portanto, de acordo com Cascudo et al (2011), o teor de umidade relativa para a cidade de Brasília estaria dentro da faixa crítica, que é de 40 a 80%, durante todo o ano.

Os fatores ambientais que interferem na carbonatação, como citado anteriormente nesse presente estudo, são: concentração de CO₂, temperatura e umidade relativa do ar. Na Tabela 08 abaixo serão apresentados os valores referentes a cada um desses fatores, e nas Figuras 12, 13 e 14, serão apresentados os gráficos para efeito comparativo entre as três garagens e estudadas.

Tabela 08: Resultados das condições ambientais.

	DATA	HORA	UMIDADE	TEMPERATURA	CONCENTRAÇÃO DE CO ₂
GARAGEM A	16/09/14	11:20	40,3%	27,9	0,0677%
GARAGEM B	23/09/14	15:30	40,0%	29,3	0,0506%
GARAGEM C	01/10/14	16:00	59,5%	25,8	0,0571%

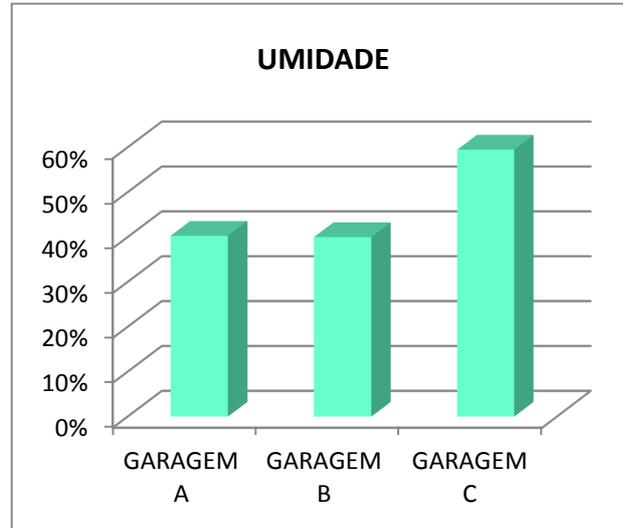
Observa-se que os valores de umidade do ar foram de 40% para as garagens A e B e de praticamente 60% para a garagem C. O ensaio foi realizado no mês de setembro, que geralmente é caracterizado por valores baixos para umidades relativas do ar, como mostrado na Tabela 07. Porém, no dia em que foi realizado o ensaio da garagem C, foi um dia de muita chuva, alta umidade, e de menores temperaturas, por isso pode-se observar valores maiores de umidade relativa.

As temperaturas variaram de 25,8°C a 29,3°C, ou seja, diferença menor que 5°C, não sendo consideradas significativas conforme Geho (1993) apud Lima (2011) que considera variações acima de 10°C como interveniente no processo de corrosão.

Em relação às concentrações de CO₂, os resultados foram de acordo com as expectativas. Como mostrado na caracterização dos edifícios, a garagem A, que está localizada no 5º subsolo do edifício, por haver pouca circulação, não haver árvores ou área verde nas proximidades, entende-se que as concentrações de CO₂ tendem a se acumular, uma vez que o ar não se renova com facilidade, apresentando assim a maior concentração comparando com as demais.

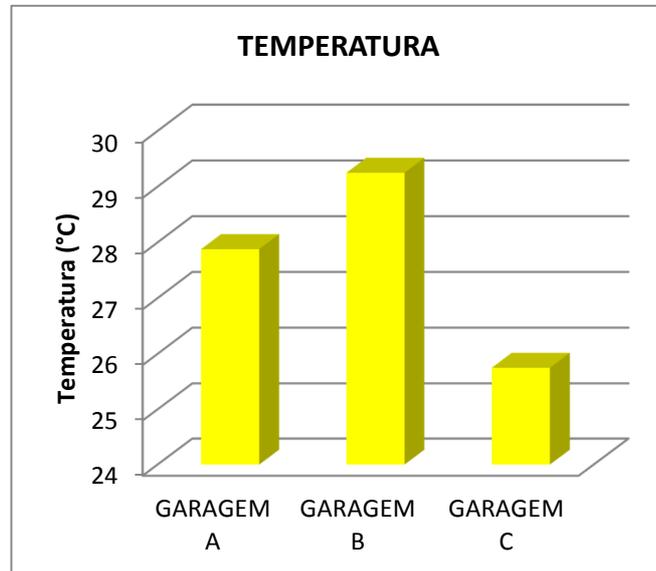
A garagem B, por estar inserida em um ambiente muito arborizado, com uma grande área verde, e possuir uma considerável circulação e renovação do ar, foi possível se constatar a menor concentração, em comparação com as demais. Por último, na garagem C, observamos que está inserida em um ambiente muito urbano, sem área verde ou árvores nas proximidades, porém, em contrapartida, há uma grande circulação e renovação do ar na garagem, não permitindo que a concentração de CO₂ se acumule, encontrando-se assim em um meio termo entre as demais.

Figura 12: Gráfico comparativo da umidade relativa do ar

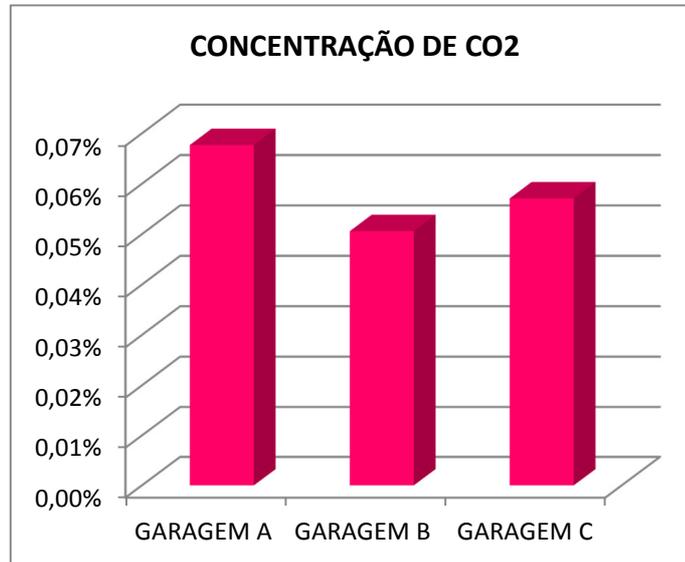


O gráfico da Figura 12 ilustra o teor de umidade relativa do ar das três garagens, em que se verifica que em todas elas o teor está dentro da faixa de maior velocidade de corrosão, conforme autores Parrott (1986) *apud* Pauletti (2004), que é de 40 a 85%.

Figura 13: Gráfico comparativo da temperatura



Observa-se que a garagem B foi a que apresentou a maior temperatura, sendo seguida da garagem A. A garagem C teve a menor temperatura, de 25,8 °C, porém no dia da leitura estava chovendo e observou-se uma redução na temperatura ambiente.

Figura 14: Gráfico comparativo da concentração de CO₂.

Observamos que a concentração de CO₂ foi maior na garagem A, por ser uma garagem localizada no 5º subsolo, uma garagem fechada e pouco ventilada, as concentrações do dióxido de carbono tendem a se acumular e apresentar valores maiores. Nas demais garagens B e C, observamos valores mais brandos, por se tratarem de garagens ventiladas com grande circulação de ar. Os valores encontrados, de acordo com a Tabela 02, se aproximam dos valores classificados como zona urbana.

5.2 Umidade do concreto

Como já citado, além da umidade relativa do ar, também foi avaliada a umidade do concreto. Para tanto, em cada rompimento de concreto, foram retiradas três amostras de concreto para determinação da umidade. O resultado da umidade de cada rompimento é feito a partir da média das três amostras colhida, cada que se encontram apresentadas nas Tabelas 09, 10 e 11.

Tabela 09: Resultados da umidade do concreto na garagem A.

GARAGEM A						
	CÁPSULA	T	CH	CS	W%	MÉDIA %
PILAR A1	112	5,34	19,69	19,52	1,20	2,34
	77	6,18	20,26	19,83	3,15	
	97	5,93	24,08	23,61	2,66	
PILAR A2	91	5,95	17,94	17,52	3,63	3,43
	83	5,62	17,76	17,26	4,30	
	102	5,57	22,55	22,16	2,35	
PILAR A3	106	6	16,89	16,64	2,35	3,14
	54	5,98	23,59	22,77	4,88	
	99	5,68	22,01	21,66	2,19	

Tabela 10: Resultados da umidade do concreto na garagem B.

GARAGEM B						
	CÁPSULA	T	CH	CS	W%	MÉDIA %
PILAR B1	86	5,7	23,45	23,21	1,37	1,95
	83	5,62	15,96	15,72	2,38	
	99	5,68	12,03	11,9	2,09	
PILAR B2	52	5,91	11,18	11,12	1,15	1,64
	79	5,93	15,09	14,92	1,89	
	123	5,96	16,27	16,08	1,88	
PILAR B3	68	5,81	10,17	10,12	1,16	2,04
	54	5,98	12,85	12,8	0,73	
	76	5,67	7,89	7,8	4,23	

Tabela 11: Resultados da umidade do concreto na garagem C.

GARAGEM C						
	CÁPSULA	T	CH	CS	W%	MÉDIA %
PILAR C1	203	27,17	46	45,68	1,73	1,57
	208	26,36	50,07	49,79	1,20	
	204	28,13	62,47	61,87	1,78	
PILAR C2	102	5,57	13,08	12,95	1,76	1,35
	80	5,93	20,07	19,94	0,93	
	106	5,98	20,29	20,1	1,35	

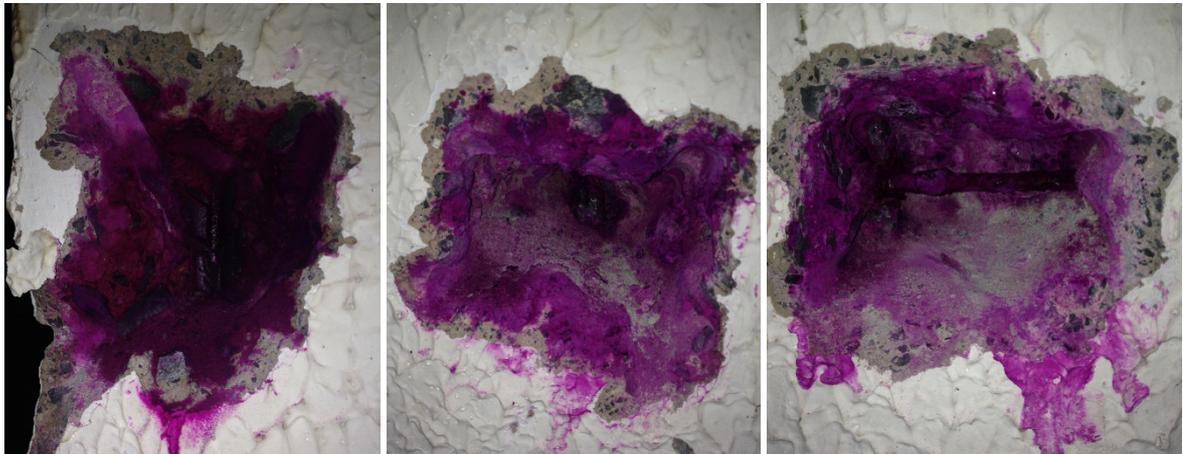
Foi possível observar uma umidade maior nas amostras da garagem A, de 2,34 a 3,43%, possivelmente por se tratar de um concreto mais novo, em torno de 5 anos. O que pode ser confirmado pelos dados obtidos para a garagem B, que teve temperaturas e umidade do ar similar a Garagem A, portanto a umidade do concreto foi menor, entre 1,64 e 2,04%. Os pilares da Garagem C apresentaram umidade de 1,35 a 1,57%, sendo os menores valores dentre os três edifícios estudados.

5.3 Profundidade de carbonatação

Após o rompimento do concreto de cobrimento dos pilares, foi aplicada a solução alcoólica de fenolftaleína, sendo realizadas quatro leituras da profundidade carbonatada, para cada um dos pilares analisados.

A primeira garagem a ser ensaiada foi a garagem A, no dia 16/09/2014. De forma geral, essa garagem apresentou uma pequena frente de carbonatação claramente identificável, como podemos observar na Figura 15.

Figura 15: Aplicação da fenolftaleína na garagem A.



PILAR A1

PILAR A2

PILAR A3

Na Tabela 12, serão apresentados, em mm, as medidas da profundidade de carbonatação referentes a cada pilar da garagem A, em cada pilar tentou-se retirar 4 (quatro) medidas: L1, L2, L3, L4, nem sempre se conseguiu todas as medidas, devido à irregularidade do rompimento.

Tabela 12: Resultados referentes a profundidade de carbonatação na garagem A.

GARAGEM A			
	PILAR A1	PILAR A2	PILAR A3
L1 (mm)	8,60	8,30	5,60
L2 (mm)	10,30	8,25	-
L3 (mm)	6,25	4,80	8,30
L4 (mm)	8,40	-	4,80
MÉDIA (mm)	8,39	7,12	6,23
COBRIMENTO (mm)	35,00	35,00	55,00

A frente de carbonatação variou de 6,23 a 8,39 mm, sendo o pilar A1 o que teve a maior profundidade. O cobrimento também foi medido, sendo de 35 mm para os dois primeiros pilares e de 55 mm para o último.

A segunda garagem ensaiada foi a garagem B, no dia 23/09/2014, que não apresentou frente de carbonatação facilmente identificável, como mostra a Figura 16. Uma característica dessa garagem é que todos os pilares apresentam revestimento argamassado e pintura. Esse fator teve grande influência na difusão do CO₂ pelo concreto, pois o dióxido de carbono precisou penetrar primeiramente a argamassa.

Figura 16: Aplicação da fenolftaleína na garagem B.



PILAR B1

PILAR B2

PILAR B3

No pilar B1 não identificou-se frente de carbonatação e no pilar B2 foi retirada apenas uma medida, mas, de forma geral, esse pilar também não apresentava frente de carbonatação. No pilar B3 pode-se observar que a frente de carbonatação não é contínua, mas possui áreas carbonatadas e outras não, nesse pilar se identificou uma camada de argamassa mais fina que as demais, o que justifica apresentar essa carbonatação. O CO₂ venceu a camada de argamassa e conseguiu chegar no concreto.

Na Tabela 13 serão apresentados os resultados referentes aos pilares da garagem B, nessa tabela também estão inclusos os valores de espessura da camada de argamassa. Buscou-se realizar 4 (quatro) leituras em cada pilar. Contudo, apenas no pilar B3 foram feitas as quatro medidas.

Tabela 13: Resultados referentes a profundidade de carbonatação na garagem B.

GARAGEM B			
	PILAR B1	PILAR B2	PILAR B3
L1 (mm)	-	11,50	8,30
L2 (mm)	-	-	7,50
L3 (mm)	-	-	15,10
L4 (mm)	-	-	15,10
MÉDIA (mm)	-	2,88	11,50
COBRIMENTO (mm)	15,30	17,10	15,10
ARGAMASSA (mm)	22,10	25,00	14,60

Verifica-se que o pilar B1 não apresentou carbonatação e o pilar B2 apenas um pequeno ponto, aonde foi realizada a única medida. No caso do pilar B3 existe carbonatação, que variou de 7,5 a 15,10 mm, sendo a média de 11,5 mm.

Nota-se que o cobrimento de concreto ficou entre 15,1 a 17,1 mm, bem inferior ao da garagem A. Contudo, a norma vigente na época da construção das garagens era diferente, visto que a garagem A tem apenas 5 anos, enquanto a garagem B tem mais de 30.

Apesar do menor cobrimento de concreto, a existência de uma camada de argamassa como revestimento, variando de 14,6 a 25,0 mm, dificultou o ingresso de gás carbônico no concreto. Logo, apesar da idade bem mais avançada que a Garagem A, não foi verificada a existência de carbonatação, exceto no pilar B3, possivelmente pela menor espessura da argamassa de revestimento.

Por último serão apresentados os resultados referentes à garagem C, os ensaios foram realizados no dia 01/10/2014. Nessa garagem, não foi possível realizar a medida do terceiro pilar devido às reclamações dos vizinhos em relação à poeira. Nessa garagem não se observou carbonatação em nenhum dos pilares analisados, isso ocorreu provavelmente devido a existência de uma camada grossa de pintura texturizada, que impediu a difusão do CO₂ pelo concreto. Nas Figura 17, serão apresentados os pilares rompidos, e na Tabela 14, serão apresentados apenas os resultados referentes ao cobrimento.

Figura 17: Aplicação da fenolftaleína na garagem C.

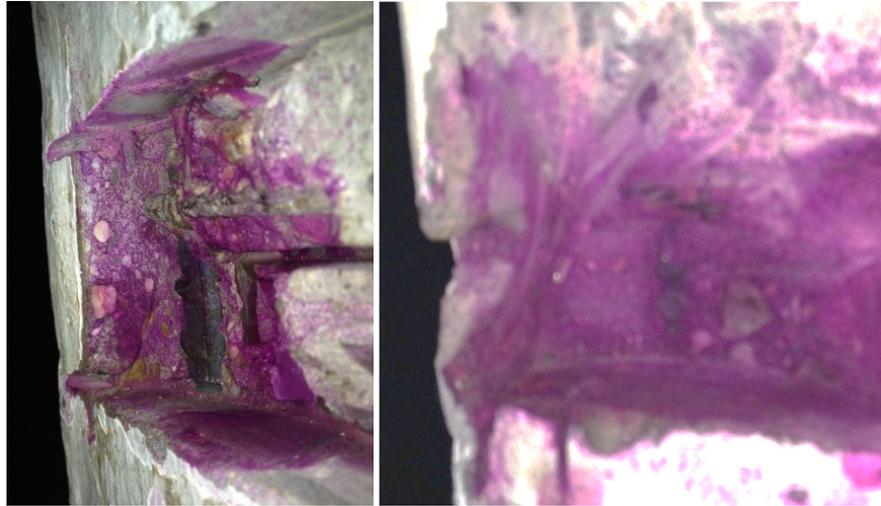


Tabela 14: Resultados referentes a profundidade ao cobrimento na garagem C.

GARAGEM C		
	PILAR C1	PILAR C2
COBRIMENTO (mm)	21,8	27,7

Como não foi verificada carbonatação, mediu-se apenas o cobrimento dos pilares, que foi de 21,8 e 27,7 mm. O edifício também possui aproximadamente 30 anos, porém os cobrimentos foram superiores aos da garagem B, com a mesma idade.

5.4 Análise comparativa

A Tabela 15 apresenta todos os resultados obtidos, permitindo comparar os resultados das três garagens analisadas.

Tabela 15: Análise comparativa dos resultados.

		GARAGEM A	GARAGEM B	GARAGEM C
IDADE		5	30	30
UMIDADE RELATIVA		40,3%	40,0%	59,5%
TEMPERATURA		27,9	29,3	25,8
CONCETRAÇÃO DE CO ₂		0,0677%	0,0506%	0,0571%
UMIDADE DO CONCRETO	PILAR 1	2,34%	1,95%	1,57%
	PILAR 2	3,43%	1,64%	1,50%
	PILAR 3	3,14%	2,04%	-
PROFUND. CARBONATAÇÃO	PILAR 1	8,4	-	-
	PILAR 2	7,1	2,88	-
	PILAR 3	6,2	-	-
COBRIMENTO1		35,0	15,3	21,8
COBRIMENTO2		35,0	17,1	27,7
COBRIMENTO3		55,0	15,1	-

Sobre a Tabela 15 sabemos que as questões ambientais, tais como umidade e temperatura são influenciadas pelas condições climáticas do dia em que se realizou cada ensaio, portanto não podem ser conclusivas. Contudo, verifica-se que se encontram na faixa de umidade que favorece a carbonatação (40 a 80%).

A concentração de CO₂ varia de acordo com a renovação de ar em cada ambiente, se é aberto ou fechado e se possui grades áreas verdes nas proximidades para maior consumo do CO₂, observamos menores concentrações na garagem B (0,0506%), mais ventilada, enquanto a garagem do 5° subsolo apresentou o maior (0,0677%), por ser a menos ventilada.

A umidade do concreto é influenciada, nesse estudo, pela idade da estrutura, concretos com pouca idade apresentam maior umidade, e concretos de maior idade tendem a ser mais secos, pois liberaram maior parte da sua umidade ao longo dos anos, observamos maior umidade na garagem A, que possui a estrutura mais jovem, apenas 5 anos.

A profundidade de carbonatação sofreu influência das condições ambientais e do concreto, que já foram abordadas nesse estudo, além da presença de revestimento nos pilares. Na garagem A, a profundidade de carbonatação pode ser dita como regular. Na garagem B, não houve carbonatação nos pilares B1 e B2, mas o pilar B3 apresentou algumas áreas carbonatadas. Na garagem C não se observou carbonatação.

Sobre o cobrimento de concreto, podemos perceber que nos prédios mais antigos de 30 anos, principalmente pela norma vigente na época, os cobrimentos eram menores, na época os estudos sobre a importância da espessura e qualidade do concreto de cobrimento ainda estavam no começo. Na garagem A, podemos observar cobrimentos bem maiores, o projetista levou em consideração as condições adversas do ambiente da garagem A para decidir a espessura do concreto de cobrimento.

5.5 Previsão de vida útil

Utilizando os valores de carbonatação na garagem A e a Equação 02 de Tuutti (1982), obteve-se os valores de previsão de vida útil para cada pilar analisado, mostrados na Tabela 16.

É importante frisar que esse modelo matemático leva em consideração poucas variáveis, não sendo, portanto, o modelo mais adequado para previsão de vida útil. Porém por carência dos demais dados, como tipo de cimento, foi optado pela utilização desse método apenas a nível de comparação, para que se possa observar a influência do cobrimento e da profundidade de carbonatação na vida útil.

A previsão de vida útil foi feita apenas na garagem A, pois pelo fato de existir revestimento argamassado na garagem B. E como o coeficiente de difusão no concreto (k) é diferente para argamassa, o modelo não seria realista. No caso da garagem C, como não existe carbonatação não é possível obter o valor de k.

Tabela 16: Previsão de vida útil na garagem A.

	PILAR A1	PILAR A2	PILAR A3
Cobrimento (mm)	35	35	55
Profundidade de carbonatação (mm)	8,4	7,1	6,2
Valor de K (mm/ano ^{0,5})	3,76	3,18	2,77
Previsão de vida útil (anos)	86,81	121,50	393,47

Nota-se que para os pilares A1 e A2, com cobrimento de 35 mm, terão vida útil de 87 a 122 anos, caso a velocidade de carbonatação se mantenha. No caso do pilar A3 que teve um cobrimento acima da norma, a vida útil chegaria a quase 400 anos nessas mesmas condições. De acordo com os resultados encontrados, podemos observar claramente a influência da espessura do concreto de cobrimento na vida útil da estrutura e a importância do seu cumprimento durante a execução da obra

Apesar de não existir revestimento argamassado nos pilares da Garagem A e a quantidade de CO₂ ser a maior das garagens estudadas, a vida útil prevista pelo modelo de Tuutti (1982) atenderia o nível superior da NBR 15.575, que estabelece 75 anos de vida útil para estruturas de concreto armado em edifícios residenciais.

6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A seguir serão apresentadas as conclusões obtidas após a realização deste trabalho:

- Verificou-se que existe carbonatação nos pilares das garagens, porém alguns fatores como a concentração de CO₂, idade das estruturas, revestimento dos pilares, alteram, de forma significativa, a profundidade de carbonatação;
- Como apresentado nos resultados e análise do presente estudo, a carbonatação natural possui diversos fatores de influência, umidade relativa, umidade do concreto, concentração de CO₂ e temperatura. Na prática apenas a concentração de CO₂ tiveram medições que coincidem com os resultados encontrados sobre a profundidade de carbonatação;
- Também se verificou grande influência de fatores que não são comumente levados em consideração, mas que para esse estudo se acredita que teve grande relevância, que são os revestimentos dos pilares, que dificultaram a difusão do CO₂ e impediram a apresentação de resultados consistentes em relação à profundidade de carbonatação, em duas das garagens ensaiadas;
- Ao contrário do esperado, as estruturas de maior idade apresentaram pouca ou quase nenhuma carbonatação quando comparada com a estrutura recente, devido, principalmente ao método construtivo que empregava revestimentos mais espessos;
- Notou-se que para se obter ambientes mais desfavoráveis, é importante que se trate de garagens totalmente enterradas e com pouca circulação de ar, pois quando se trata de garagens abertas, ou com uma renovação de ar importante, a concentração de CO₂ é diretamente influenciada.

De forma geral, esse estudo conclui que para uma análise mais consistente da frente de carbonatação natural, não se deve observar apenas as condições de temperatura e umidade da cidade, mesmo Brasília se tratando de uma cidade que registra baixas umidades relativas durante um longo período do ano, presenciou-se carbonatação, mas principalmente influenciadas pelo microclima, ou seja, por influências pontuais, no local em que a estrutura está inserida, e elas podem ter grandes variações em diversos pontos da cidade, e todas essas variações precisam ser levadas em consideração.

O estudo da carbonatação natural é importante, pois nos dá resultados realmente práticos, não apenas teóricos, como a carbonatação se comporta em cada tipo de estrutura, com idades, condições climáticas, resistências, tipos de concreto, completamente diferentes. Além de permitir estimar a vida útil da mesma utilizando modelos de previsão.

Para complementar, apresentam-se algumas sugestões de trabalhos futuros sobre o tema estudado:

O estudo da carbonatação natural é importante, pois nos dá resultados realmente práticos, não apenas teóricos, como a carbonatação se comporta em cada tipo de estrutura, com idades, condições climáticas, resistências, tipos de concreto, completamente diferentes. Para complementar trabalhos como este sugere-se:

- Analisar a frente de carbonatação em estruturas de concreto armado em garagens fechadas.
- Aprofundar os estudos sobre a influência dos revestimentos das estruturas de concreto armado em relação a difusão do CO₂ através do concreto.
- Analisar a frente de carbonatação de estruturas de concreto armado em pilares sem revestimentos argamassados.
- Aplicar os diferentes métodos de previsão de vida útil de acordo com os dados coletados, para comparação.

- Estudar a carbonatação natural em garagens usando diferentes métodos de análise, além da fenolftaleína.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6118**. Projetos de estrutura de concreto - Procedimento. 2014

ANDRADE, C. M.; ALONSO C. **Vida útil y residual de estructuras de hermigón**. Seminário: prevenção da corrosão em estruturas de betão armado LNEC, Lisboa, Portugal, 1996.

ANDRADE, C. Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras. Trad. De Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, Pini, 1992.

CARMONA, T.G. **Modelos de Previsão da Despassivação das Armaduras em Estruturas de Concreto Sujeitas à Carbonatação**. 2005. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, PCC.USP, São Paulo.

CASCUDO, O. e CASAREK, H. **Concreto: Ciência e Tecnologia** Vol. I. Capítulo 24. IBRACON, 2011.

FIGUEIREDO, E.J.; MEIRA, G.R. **Concreto: Ciência e Tecnologia** Vol. I. Capítulo 26. IBRACON, 2011

HELENE, P. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de análise**. Elsevier, 2013.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993, 213f. Tese (Livre Docência) - Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. Vida útil das estruturas de concreto. In: CONGRESSO DE CONTROLE QUALIDADE, IV, Porto Alegre, 1997. Anais...Rio Grande do Sul: CONPAT, 1997.

LEVY, A.M.; HELENE, P. R. L. **Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development.** Cement and Concrete Research, Elsevier, 2004.

LIMA, M.G. **Concreto: Ciência e Tecnologia** Vol. I. Capítulo 21. IBRACON, 2011
MEDEIROS, M.H.F., ANDRADE, J.J.O. e HELENE, P. **Concreto: Ciência e Tecnologia** Vol. I. Capítulo 22. IBRACON, 2011

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

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** São Paulo: Pini, 1997.

PAPADAKIS, V.G.; VAYENAS, C.G.; FARDIS, M.N. Fundamental concrete carbonation model and application to durability of reinforced concrete. In: DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 1990, Brighton. Proceedings...London, BRE, 1991b.

PAPADAKIS, V.G.; VAYENAS, C.G.; FARDIS, M.N. Fundamental Modeling and experimental investigation of concrete carbonation. ACI Materials Journal, n. 88, 1991a.

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.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. 2004. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

POSSAN, E. **Modelagem da Carbonatação e Precisão de Vida Útil de Estruturas de Concreto em Ambiente Urbano**. 2010. 263f. Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

RIBEIRO, D.V. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de análise**. Capítulo 03. Elsevier, 2013

RIBEIRO, D.V. e CUNHA, M.P.T. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de análise**. Capítulo 06. Elsevier, 2013

SOUSA, C.A.C. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de análise**. Capítulo 02. Elsevier, 2013

TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, Suecis, 1982.