

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
NÍVEL MESTRADO

ANA PAULA BARBOSA ALVES

ANÁLISE DA VIDA ÚTIL RESIDUAL DE ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO
EM EDIFICAÇÕES URBANAS - ESTUDO DE CASO

São Leopoldo

2019

ANA PAULA BARBOSA ALVES

**ANÁLISE DA VIDA ÚTIL RESIDUAL DE ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO
EM EDIFICAÇÕES URBANAS - ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Bernardo F. Tutikian

Co-orientadora: Ms. Fernanda Pacheco

São Leopoldo

2019

A474a Alves, Ana Paula Barbosa
 Análise da vida útil residual de elementos de concreto armado em edificações urbanas - estudo de caso / Ana Paula Barbosa Alves -- 2019.
 88 f. : il. ; color. 30cm.

 Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Leopoldo, RS, 2019.

 Orientador: Prof. Dr. Bernardo F. Tutikian. Coorientadora: Ms. Fernanda Pacheco.

 1. Construção civil. 2. Concreto armado. 3. Corrosão de armaduras. 4. Concreto - Carbonatação. 5. Recuperação. 6. Durabilidade. I. Título. II. Tutikian, Bernardo F. II. Pacheco, Fernanda.

CDU 624

ANA PAULA BARBOSA ALVES

**ANÁLISE DA VIDA ÚTIL RESIDUAL EM ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO NO MEIO URBANO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 26 de Abril de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Alessandra Teribele Universidade Vale dos Sinos - Unisinos

Dóris Zechmeister Bragança Weinmann – Universidade Vale dos Sinos -
Unisinos

Carlos Amado Britez – Universidade de São Paulo - USP

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, meus pais Ademir e Isabel, por sempre me ensinarem a importância do conhecimento;

Ao meu marido, Gustavo, pela compreensão durante minhas ausências e pelo amparo durante os momentos de desespero ao longo da escrita deste trabalho;

A todos os amigos que também compreenderam que abri mão de estarmos juntos para que essa etapa fosse finalizada e principalmente minha amiga Lídia pelos conselhos, os incentivos e desabafos no decorrer desse ano;

Um “muito obrigada” à minha co-orientadora, Fernanda, que me ajudou em muitos momentos no decorrer das correções e ao meu orientador Bernardo, que me propiciou enxergar pequenos grandes detalhes que fizeram toda a diferença e ao Laboratório de Materiais de Construção e ao ITT Performance – Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos;

Por fim e não menos importante, agradeço à Bruna e Vinícius, que foram os responsáveis pelas permissões do trabalho de campo.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram com este estudo, minha eterna gratidão.

“No começo tudo é loucura ou sonho. Nada do que o homem fez no mundo teve início de outra maneira - mas tantos sonhos se realizaram que não temos o direito de duvidar de nenhum”.

Monteiro Lobato

RESUMO

A carbonatação do concreto é uma das manifestações patológicas de ocorrência predominante em meios urbanos, dada a presença de dióxido de carbono. Se não identificada e tratada, pode conduzir à perda precoce de vida útil das edificações, afetando a sua segurança e estabilidade. O presente estudo teve como objetivo analisar a frente de avanço da carbonatação em pilares de três edifícios localizados na cidade de Porto Alegre – RS, verificando a vida útil residual das edificações, considerada em relação à despassivação das armaduras de aço. Cabe destacar que a edificação 01 se localiza a margem da rodovia BR 116 e Avenida dos Estados, local de tráfego intenso, e os edifícios 02 e 03 estão no bairro Moinhos de Vento, composto por clínicas, consultórios e demais edifícios corporativos, que também com um alto fluxo de veículos. Para colaborar com o entendimento da hipótese, uma extensa revisão teórica foi descrita e através dela foram elencados os problemas e alternativas. Para identificação da frente de carbonatação nos pilares dos edifícios aplicou-se análise colorimétrica com uso de indicador químico de potencial hidrogeniônico, pelo método de coleta do pó das estruturas de concreto. De posse da frente de carbonatação no momento da análise, estimou-se a vida útil das edificações através de modelos teóricos. Os resultados que os edifícios sob estudo apresentaram superfícies carbonatadas, cobrimento da armadura abaixo do prescrito em norma e, inclusive, elementos com vida útil terminada. Pode-se perceber nos diferentes elementos inspecionados a influência da classe de agressividade ambiental na frente de dano. Verificou-se ainda, não conformidade do cobrimento com o preconizado em norma. Assim, sugere-se maior atenção nas fases de projeto, execução e utilização, bem como a recuperação de alguns elementos, de forma a prolongar a vida útil e a segurança em uso e operação.

Palavras-chave: Corrosão de armaduras, carbonatação, vida útil, recuperação, durabilidade.

ABSTRACT

The carbonation of concrete is one of the pathological manifestations of predominant occurrence in urban environments, due to the presence of carbon dioxide. If not identified and treated, this might cause the loss of buildings lifespan. The present study has as objective to analyze the advance of the carbonation in pillars of three buildings located in the city of Porto Alegre – RS, verifying the residual lifespan of the buildings, regarding the depassivation of the steel reinforcement. It is pertinent to highlight that the edification 01 is located by the highway BR 116, and the avenue “Avenida dos Estados”, places of intense traffic, and buildings 02 and 03 are in the neighborhood “Moinho dos Ventos”, constituted by clinics, medical practices, and corporate buildings, that also bring a high vehicle flux. To collaborate in the understanding of the hypothesis, a broad theoretical review was described, and, using it, the problems and alternatives were elicited. To identify the carbonation advance in the building's pillars, a colorimetric analysis was employed using the chemical indicator of hydrogen-ionic potential, via dust collection method of the concrete structures. Possessing the carbonation advance, the lifespan of the buildings was estimated using theoretical methods. The results have shown that the studied buildings had carbonated surfaces, reinforcement coating under the ideal referred in the standards and, in addition, elements with terminated lifespan. It is possible to notice in the different inspected elements the influence of the environmental class of aggressiveness in the face of damage. It was also verified a non-conformity of the coating with the standards proposition. Thus, it is suggested higher attention in the phases of project, execution, use, as well as the recuperation of some elements aiming to extend the lifespan and the safety of use and operation.

Key-words: Reinforcement corrosion, carbonation, lifespan, recovery, durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Controle Tecnológico de Estruturas de Concreto	20
Figura 2 - Deterioração do concreto por processo físico-químico	30
Figura 3 - Esquema da ação da carbonatação.....	32
Figura 4 – Etapas de campo	41
Figura 5 - Localização do edifício administrativo.....	42
Figura 6 – Fachada do edifício	43
Figura 7 - Marcação de pilares para coleta de amostras - lateral.....	44
Figura 8- Marcação dos pilares - frente da edificação, lado esquerdo	44
Figura 9 - Marcação dos pilares- frente da edificação, lado direito	45
Figura 10 – Mapa de localização do Prédio 02	46
Figura 11 - Fachada – Prédio 02.....	47
Figura 12 – Local de retirada de amostra na entrada.....	47
Figura 13 - Local de retirada de amostras.....	48
Figura 14 - Local de retirada de amostras.....	48
Figura 15 - Mapa de localização do Prédio 03.	49
Figura 16 - Vista Lateral Edifício.	50
Figura 17 - Local de retirada de amostras – garagem.....	50
Figura 18 - Local de retirada de amostras da garagem.....	51
Figura 19 - Detector de partículas eletromagnéticas para determinação de espessura	53
Figura 20 - Remoção da pintura e limpeza	53
Figura 21- Processo de furação com broca de 8mm e embalagem <i>ziplock</i> para coleta de amostra	54
Figura 22 - Paquímetro utilizado para determinação de profundidade.....	54
Figura 23 - Identificação de amostras	55
Figura 24- Aplicação de fenolftaleína para indicativo de carbonatação	56
Figura 25 - Tabela de variáveis levantadas para tratamento de dados.....	57
Figura 26 - Demonstração do cálculo realizado- obtenção da vida útil residual.....	60

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Manifestação patológica de acordo com as fases de projeto.	29
Gráfico 2 - Representação esquemática adaptada do modelo de Tuutti.....	34
Gráfico 3 - Formas de degradação das estruturas de concreto armado.	35
Gráfico 4 - Relação desempenho <i>versus</i> tempo para determinação de vida útil.	37
Gráfico 5: Vida residual dos pilares de amostragem do edifício Prédio 01.	61
Gráfico 6 - Vida residual dos pilares de amostragem do edifício Prédio 02.	65
Gráfico 7: Vida residual dos pilares de amostragem do edifício Prédio 03.	68
Gráfico 8 - Valores de cobrimento referenciados em norma x cobrimento encontrado	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da durabilidade do concreto em relação à porosidade e absorção de água.....	21
Tabela 2 - Aplicação do concreto com relação à agressão ambiental	22
Tabela 3 - Vida útil para sistemas e elementos.....	23
Tabela 4 - Classes de agressividade ambiental.....	24
Tabela 5 - Cobrimento nominal, em mm, de acordo com a agressividade ambiental	24
Tabela 6 – Cobrimentos DIN 1045 em mm segundo classes de exposição	25
Tabela 7 – Estratégias e Critérios segundo a DIN 1045	26
Tabela 8 - Modelos teóricos de previsão de vida útil em relação à carbonatação	38
Tabela 9 - Fatores técnicos e resultados de coleta de amostras – Prédio 01	59
Tabela 10 – Tabela resumo das variáveis utilizadas na equação de Tuutti e os resultados obtidos	60
Tabela 11- Fatores técnicos e resultados de coleta de amostras – Prédio 02	63
Tabela 12 – Tabela resumo das variáveis utilizadas na equação de Tuutti e os resultados obtidos	64
Tabela 13 - Fatores técnicos e resultados de coleta de amostras – Prédio 3	67
Tabela 14 – Tabela resumo das variáveis utilizadas na equação de Tuutti e os resultados obtidos	68

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA	16
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	16
1.3 OBJETIVOS	17
1.3.1 Objetivo Geral	17
1.3.2 Objetivos Específicos	17
1.4 JUSTIFICATIVA	17
1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO	19
2.2 VULNERABILIDADE DO CONCRETO EM RELAÇÃO AO FATOR AMBIENTE: DURABILIDADE, VIDA ÚTIL E DESEMPENHO	22
2.2.1 Efeitos da Ação do Ambiente	26
2.3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DO CONCRETO	27
2.3.1 Carbonatação	30
2.4 MODELOS TEÓRICOS DE PREVISÃO DA VIDA ÚTIL.....	33
2.4.1 Modelos Teóricos de Previsão de Carbonatação	37
3 MÉTODO DE PESQUISA	41
3.1 ETAPAS DO ESTUDO	41
3.2 OBJETOS DE ESTUDO.....	42
3.2.1 Edifício Administrativo Prédio 01	42
3.2.2 Edifício Garagem Prédio 02.....	45
3.2.3 Edifício Prédio 03	49
3.3 MÉTODOS	51
3.3.1 Método de Amostragem.....	51
3.3.2 Verificação do cobrimento	52
3.3.3 Limpeza da superfície.....	53
3.3.4 Furação e coleta do pó	54
3.3.5 Aplicação de solução de fenolftaleína.....	55
3.3.6 Verificação da Profundidade de Carbonatação	56
3.4 TRATAMENTO DOS DADOS	56
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	58

4.1 PRÉDIO 1 – EDIFÍCIO ADMINISTRATIVO.....	58
4.2 PRÉDIO 2 – EDIFÍCIO GARAGEM.....	62
4.2 PRÉDIO 3 – EDIFÍCIO GARAGEM.....	66
5 DISCUSSÃO	70
5.1 AGRESSIVIDADE DO MEIO URBANO	70
5.2 ANÁLISE DO COBRIMENTO OBTIDO E CONFORMIDADE COM RESPECTIVAS NORMAS TÉCNICAS	73
6 CONCLUSÃO	75
6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
APÊNDICES	84

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução da construção civil, ocorreu o aperfeiçoamento dos sistemas construtivos, permitindo maior produtividade e menores custos. Mesmo com tais mudanças, o concreto ainda é o principal material da construção utilizado em pontes, edifícios, vigas pré-moldadas, estruturas moldadas *in loco*, etc (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Carmona (2013), essa utilização expressiva ocorre por razões claras, como a elevada durabilidade, custos inferiores e adaptabilidade em sua moldagem, em relação a outros materiais. Dada essa versatilidade, o concreto vem sendo estudado com mais intensidade.

O concreto pode ser definido como um material composto que consiste em um meio contínuo aglomerante, no qual estão imersas partículas de agregados. O aglomerante comumente utilizado é o cimento Portland. As partículas de agregados são a dos agregados graúdos (com partículas maiores que 4,8mm) e a dos agregados miúdos (partículas inferiores a 4,8mm). Atualmente, são adicionados materiais tais como os aditivos químicos, que modificam algumas características, com a finalidade de facilitar a aplicação e melhorar sua trabalhabilidade. Entre os aditivos mais comuns estão os plastificantes, os retardadores, os aceleradores de pega, os incorporadores de ar e os superplastificantes (NEVILLE, 2016)

Entretanto, dada a não homogeneidade do material, são necessários cuidados na dosagem, sendo os principais componentes a água, cimento, agregados miúdos e graúdos, em todo o processo e aplicação. Tutikian e Helene (2011) destacam que a dosagem eficiente é “*a melhor proporção entre os materiais constitutivos do concreto*”. Atualmente, considerando a disponibilidade de materiais que podem ser utilizados em um estudo de dosagem e variações de disponibilidade de insumos, ainda não há um procedimento padrão normatizado, e sim procedimentos teóricos de relevância nacional e internacional, como os procedimentos do IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto).

Silva (2006) relata que o concreto tem sido fundamental nas construções de pequeno, médio e grande porte, no entanto, o dimensionamento e projeto das estruturas têm de levar em consideração fatores como durabilidade e resistência necessária. Cidades com um alto índice de poluição ou regiões marítimas têm fatores propícios para acelerar processos de deterioração nas estruturas de concreto

armado, como ataques químicos, carbonatação e fissuração, ocasionando um dos problemas de maior relevância no concreto: a corrosão das armaduras. A consideração da deterioração e do meio de inserção é feita pela norma brasileira de dimensionamento de estruturas de concreto (ABNT NBR 6118).

Segundo Helene (1997), a corrosão é um dos resultados químicos ou eletroquímicos do contato do material com o meio ambiente, relacionada em determinados casos com ações físicas ou mecânicas de deterioração.

Em termos do ambiente de inserção, Possan e Andrade (2014) relatam que a degradação por corrosão, que ocorre em estruturas de concreto, faz com que os custos de manutenção, reparo e reabilitação de estruturas seja exorbitante, tanto que estudos buscam minimizar esse dano patológico através da adição de componentes diversos, como materiais pozolânicos e aditivos químicos. Dentre os agentes corrosivos e as questões ambientais ligadas a este fenômeno, estão os locais mais expostos à umidade e agressividade, ou em áreas com muitas falhas, como a alta porosidade. Além disso, inúmeros fatores contribuem para a corrosão, desde o ataque por águas sulfatadas, a reação álcali-agregado, a retração por secagem, a penetração de cloretos, a carbonatação, entre outras. Celadyn (2016) acrescenta que a durabilidade das edificações pode ser compreendida como o resultado das interações dos materiais e suas propriedades e o meio externo.

Um dos principais mecanismos desencadeadores da corrosão das armaduras é a penetração de íons cloreto, procedente da maresia ou contato direto com a água do mar, pois são dissolvidos pela chuva e adentram na estrutura através da absorção capilar, provocando, ao longo dos anos, a corrosão das armaduras. Já em ambientes urbanos, garagens ou onde há intenso tráfego de veículos, indústrias e, por consequência, emissão de gases, a probabilidade de corrosão se dá através da carbonatação, que é um dos mecanismos de ocorrência desta manifestação patológica. Em qualquer dos cenários, a fissuração e a qualidade do concreto influenciam na velocidade de surgimento e alcance do dano (SHAIKH, 2018).

Souza (2014) cita que o processo de corrosão é espontâneo e causado pela necessidade de um material atingir seu menor estado de energia – seu estado mais estável. A maioria dos metais como matéria-prima na natureza é encontrada como compostos óxidos ou hidróxidos, uma vez que, nessa forma, seu estado de energia é mínimo. A partir do processamento (fundição, usinagem, etc.), os materiais assumem um estado metálico, entretanto, ao entrar em contato com o ambiente,

reagem de forma espontânea a se tornar um composto com menor estado de energia. Como exemplo tem-se o ferro, utilizado em armaduras de aço nas estruturas de concreto, que reage com o ambiente formando o óxido de ferro (Fe_2O_3) conhecido como ferrugem, que é o seu menor estado de energia.

Tem-se que a oxi-redução se configura por reações em que os elementos ganham ou perdem elétrons. Se houver uma perda de elétrons a reação será chamada de reação de oxidação; quando há ganho de elétrons é chamada de redução. O elemento que sofre oxidação é chamado de agente redutor e o que sofre redução é chamado de agente oxidante. No processo de corrosão dos materiais metálicos, essa reação se caracteriza pela dissolução do material através de um processo eletroquímico com fluxo de íons e elétrons entre as regiões catódicas e anódicas (CALLISTER, 2008; SOUZA, 2014). Com tais alterações, percebe-se em um ponto a expansão volumétrica e no outro a retração, causando fissuração, e deixando as estruturas susceptíveis a uma maior deterioração.

Ainda, a corrosão é apontada como uma das principais causas de deterioração de estruturas. No concreto armado, a corrosão pode se manifestar de maneira generalizada, relativamente uniforme na superfície do aço, e na forma de pites de corrosão pontual ou em profundidade. Já em estruturas de concreto protendido, ocorre em cabos sob altos níveis de tensão. Nestes casos, age de maneira transgranular ou transcristalina, cuja característica é a ruptura brusca dos cabos sem sintomas prévios, com elevado impacto e risco. A corrosão no concreto armado ocorre em locais expostos à umidade e agentes agressivos, ou em áreas com falhas, como nichos de concretagem que, pela porosidade local, acabam por facilitar a penetração de agentes agressivos (MEDEIROS, 2008).

A corrosão ocorre quando as armaduras foram despassivadas, ou seja, perderam a proteção proporcionada pelo concreto. Nesse cenário, percebe-se a importância da camada de cobrimento do concreto, que por sua espessura e qualidade de composição, garante a proteção (ABNT NBR 6118:2014). Uma vez que a estrutura encontra-se despassivada, há perda da garantia de seu funcionamento no estado de serviço.

Com todos os aspectos mencionados, é interessante destacar que existem verificações do estado de dano e seu avanço nas edificações. Nesse cenário, tem-se a previsão de vida útil das estruturas conforme relatam Medeiros, Andrade e Helene (2011, p. 05), afirmando que o conhecimento da durabilidade e dos métodos

de previsão da vida útil das estruturas de concreto são fundamentais para auxiliar na previsão do comportamento do concreto em longo prazo. Os autores destacam a importância das tarefas de manutenção e acompanhamento das estruturas, afirmando que:

“O conceito de vida útil é introduzido no projeto estrutural de forma análoga ao de introdução da segurança; prevenir manifestações patológicas precoces nas estruturas- esse conhecimento é fundamental para reduzir riscos de fissuras, corrosão, expansões e outros problemas nas estruturas; • contribuir para a economia, sustentabilidade e durabilidade das estruturas- sempre lembrando que fazer uma boa engenharia significa manejar bem custos, técnica, recursos humanos e respeito ao meio ambiente.”

Ainda, existem normas nacionais (ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento; ABNT NBR 15575:2013 - Edificações Habitacionais – Desempenho; ABNT NBR 8681:2003 Ações e segurança nas estruturas – Procedimento; ABNT NBR 12655:2015–Concreto de Cimento Portland), além de normas e documentos internacionais, como a CEB 183:1992 *Durable Concrete Structures*; CEB-FIP *Model Code 90*; *Fib Model Code 2010*; *Fib (CEB-FIP) Model Code 2006 for Service Life Design*; ACI 201.1R-08; ACI 365.1R 00 e a norma europeia EN-206 que tem contribuído para firmar princípios sobre a durabilidade e o aumento da vida útil das estruturas de concreto. Ainda nesse cenário, destaca-se a norma alemã DIN EN 14630:2007, que detalha ensaios de superfícies carbonatadas e a DIN 1045:1989 que trata de cobrimentos, embasando as análises de previsão de vida útil e estado de conservação das estruturas (MEDEIROS, ANDRADE e HELENE, 2011).

Nessas normas e códigos técnicos, buscam-se a atribuição e coleta de características que possam proteger estruturas dos agentes nocivos, bem como aumentar a durabilidade e a vida útil das estruturas por meio de da avaliação da composição do concreto de acordo como parâmetro de funcionalidade e eficiência (NBR 6118, ABNT: 2014).

Assim, considerando que a corrosão ocorre ao longo do tempo e de acordo com a classe de agressividade do local de inserção da estrutura, levando-se em conta tanto a composição do concreto estrutural quanto o ambiente, se faz necessário e importante o monitoramento e a manutenção destas estruturas (MEDEIROS, 2008). Ao analisar-se a elevada vida útil que as estruturas de concreto

podem apresentar, é de se prever que cada vez mais serão investidos recursos em sua manutenção, em relação aos recursos com novas edificações (LI; HERBERT, 2012).

Diante do exposto, a NBR 6118 (ABNT, 2014) reuniu diferentes ambientes e sua influência direta nas estruturas, sendo os ambientes: rural, submerso, urbano com duas classes, marinho, industrial também com duas classes e ambientes de respingos de maré. Esses grupos, chamados de classes de agressividade, vinculam o ambiente das estruturas com características de composição, visando a garantia da durabilidade. Considerando o cenário apresentado, o presente estudo avaliou três edifícios em atmosferas agressivas em meio urbano, sendo dois utilizados como estacionamento e um como ambiente empresarial – todos na cidade de Porto Alegre/RS -, a fim de analisar a profundidade da carbonatação e a consequente previsão de vida útil residual dos elementos de concreto armado

Buscou-se identificar as características de exposição das estruturas, seu estado de deterioração e vida útil residual.

1.1 TEMA

O tema da pesquisa é a avaliação de vida útil residual de estruturas de concreto armado, inseridas no meio urbano, verificada por meio de mensuração da frente de carbonatação.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho limita-se ao estudo de frentes de carbonatação em três edifícios submetidos à exposição de agentes poluidores urbanos. O fenômeno da carbonatação foi a manifestação patológica eleita dada à preocupação com mudanças na microestrutura e na diminuição do pH do concreto e por ser capaz de reduzir a proteção passiva das armaduras, aumentando a vulnerabilidade à corrosão e comprometendo a durabilidade. Soma-se ao apresentado, que a carbonatação tem ocorrência expressiva em grandes centros urbanos, como os edifícios trazidos nesse estudo. Uma vez que a carbonatação é considerada um dano patológico do concreto, buscou-se evidenciar qual a sua gravidade em termos de profundidade verificada em elementos de concreto presentes em três edifícios em meio urbano. O

processo de escolha dos edifícios teve direta relação com locais com elevada concentração de dióxido de carbono, não sendo avaliados os demais agentes frequentes de dano das estruturas que podem atuar nas estruturas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar como a agressividade de um ambiente urbano influencia na vida útil de estruturas de concreto armado, no que tange o avanço da frente de carbonatação.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar os ambientes de inserção de cada uma das edificações, em termos de vocação e elementos nas cercanias;
- b) Comparar o cobrimento obtido em campo pelo detector de partículas eletromagnéticas com o preconizado em normas técnicas.

1.4 JUSTIFICATIVA

De acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013): “a vida útil consiste no período de tempo em que um componente ou sistema construtivo satisfaz os requisitos de desempenho destinando-se as atividades para as quais foram projetados”. No Brasil, a Norma de Desempenho prescreveu a vida útil de estruturas mínima em 50 anos, devendo ser o estado de uso dessa edificação mantido, considerando as manutenções especificadas na NBR 15575 (ABNT, 2013).

A deterioração de inúmeras estruturas de concreto devido à corrosão da armadura é um dos principais problemas associados à durabilidade do concreto. Tanto pela gravidade do problema quanto pela frequência de ocorrência de corrosão da armadura, evidencia-se a necessidade de buscar soluções que contribuam para minimizar a incidência e evolução do processo corrosivo nas estruturas de concreto. Após iniciada, caso não haja intervenções de tratamentos e recuperações, a corrosão adquire uma constante de progressão ininterrupta em praticamente todos os casos, além de ser a manifestação patológica mais recorrente nas estruturas de

concreto armado, causando problemas tanto na estética quanto na utilização e segurança das estruturas. O processo corrosivo se caracteriza por provocar a perda de seção do aço e, conseqüentemente, danos ou incapacidade estrutural de um elemento ou conjunto de elementos (AMORIM, 2010).

Analizados estes aspectos, os fatores corrosão e carbonatação podem causar danos a uma estrutura se não forem considerados em projeto e planejamento. Os fatores mais importantes na determinação da vida útil são o concreto em si, o ambiente onde se encontra a edificação, os macros e microclimas onde está inserida a edificação e as intempéries a que poderá ser submetida, como a presença de ácidos, produtos químicos específicos, condições de exposição e ciclagem de temperatura (HELENE, 1983; ISLAM; ISLAM, 2013).

A durabilidade não é simplesmente uma característica dos materiais, mas um resultado da interação de um material ou componente com o meio ambiente. Esta interação provoca alterações na capacidade de atendimento das demais necessidades dos usuários, ou seja, pode provocar uma degradação. Ela pode, também, ser expressa em termos de vida útil residual, definida como o período de tempo durante o qual um produto atende às exigências dos usuários. Comumente considera-se a vida útil exigida ou esperada de um elemento estrutural como aquela que deve ser igual à do edifício (AMORIM, 2010).

Partindo-se desta premissa, este trabalho justifica-se pela avaliação da qualidade, tempo de vida útil residual e frente de carbonatação do concreto de edificações em diferentes ambientes espaciais e distintas características de agressividade do meio, podendo-se então, avaliar a reação destas à diferentes exposições e fatores que interferem em sua vida útil.

1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esse estudo está dividido em cinco capítulos. No capítulo um é esclarecido o tema, seus objetivos e justificativa. O segundo capítulo traz o desenvolvimento teórico do assunto, adentrando nos conceitos e normas definidos por importância em relação à vida útil e carbonatação. Expõem-se os principais mecanismos de danos nas edificações, diretrizes de normas técnicas, entre outros. No terceiro capítulo foram tratados os materiais e os métodos utilizados no estudo, e nos capítulos quatro e cinco foram considerados os resultados obtidos e as conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO

O concreto armado começou a ser utilizado por volta de 1850, e hoje é o mais usado nas construções do mundo inteiro. Porém, naquela época não existia a preocupação sobre a durabilidade e a vida útil que hoje é considerada primordial (HELENE, MEDEIROS, GOBBI, 2013), dada a percepção do dano ambiental causado pelo consumo de cimento e pela geração de resíduos de construção e demolição (PEREIRA, VIEIRA, 2013).

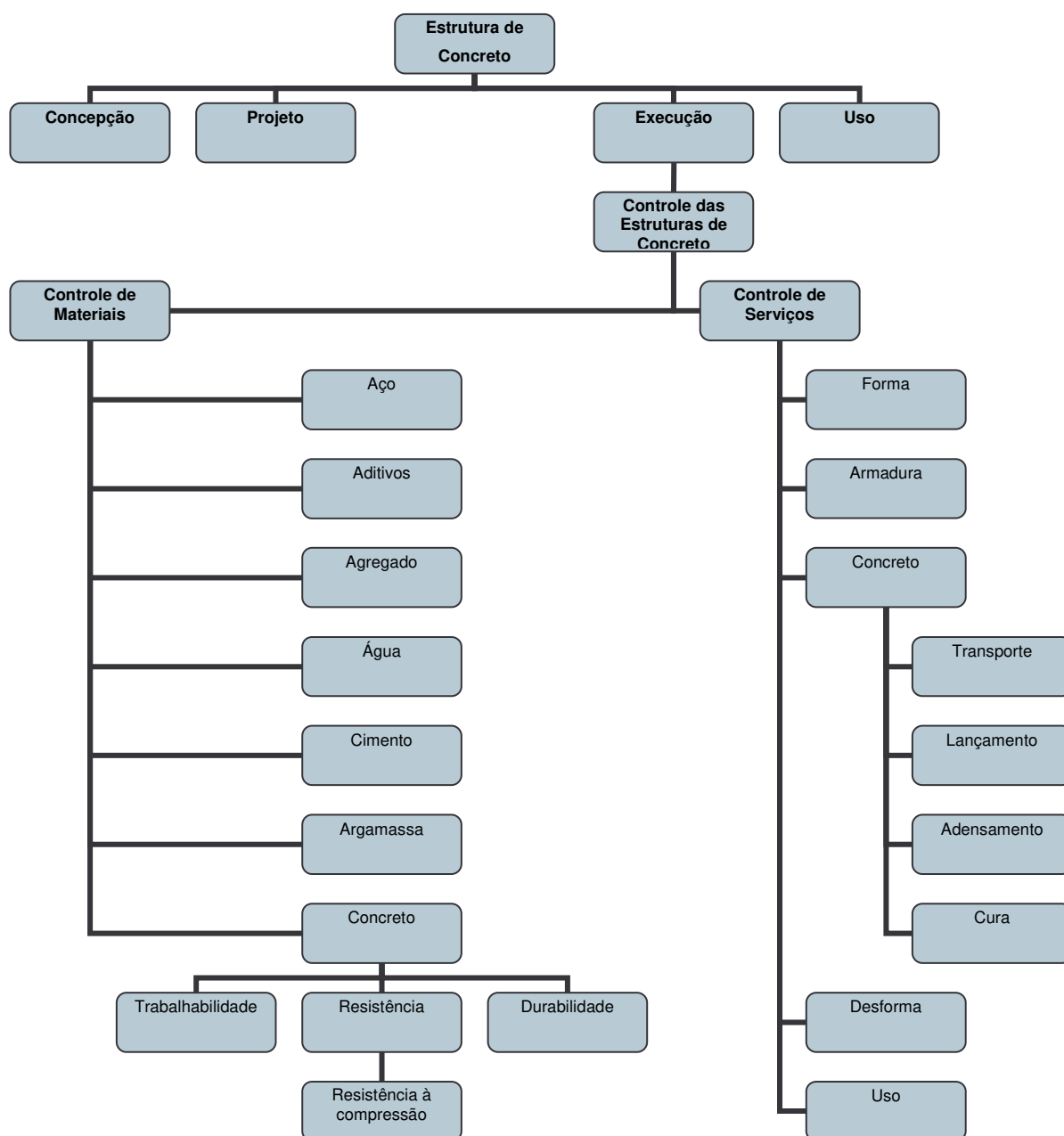
As principais propriedades mecânicas em projeto e verificações do concreto são: resistência à compressão e módulo de elasticidade. Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios executados em condições específicas. Geralmente, os ensaios são realizados para controle da qualidade e atendimento às especificações (CALLISTER, 2008).

Pinheiro, Muzardo e Santos (2003) explicam que a resistência à compressão é fundamental em estruturas de concreto, entretanto, o concreto simples apresenta menor a resistência à tração em relação ao aço. Por isso, é imperativa a associação do aço ao concreto, obtendo-se o concreto armado. O aço por si só é uma liga metálica composta principalmente de ferro e de pequenas quantidades de carbono (em torno de 0,002% até 2%), já o aço estrutural, direcionado à construção civil, possuem teores de carbono da ordem de 0,18% a 0,25%. Entre outras propriedades, o aço apresenta resistência e ductilidade, muito importantes para as construções e, sendo adequadamente dimensionado e detalhado, resiste muito bem à maioria dos tipos de solicitação. Mesmo em peças comprimidas, além de fornecer ductilidade, o aço aumenta a resistência à compressão.

De acordo com Pinheiro et al. (2010), os principais fatores influenciadores nas propriedades do concreto, são a) tipo e quantidade de cimento; b) relação água-cimento; c) tipos de agregados, granulometria e relação agregado-cimento; d) presença de aditivos e adições; e) procedimento e duração do processo de mistura; f) condições e duração do transporte e do lançamento; g) condições de adensamento e de cura; h) tipo e duração do carregamento e i) idade do concreto, umidade e temperatura.

Pacheco e Helene (2013) citam que as operações de controle de resistência à compressão podem ser definidas como operação de controle de qualidade. Entretanto, os autores salientam que esta é apenas uma das variáveis a serem observadas nas estruturas de concreto. Desta forma, recomenda-se o diagrama de Terzian (1993), a fim de ilustrar o processo de controle tecnológico de estruturas, conforme mostra a Figura 01.

Figura 1 - Diagrama de Controle Tecnológico de Estruturas de Concreto



Fonte: Terzian, 1993 *apud* Pacheco e Helene, 2013.

Inicialmente, em relação à composição do concreto, os agregados eram considerados como materiais inertes e de baixo custo. Entretanto, foi descoberto que não são completamente inertes, pois suas propriedades físicas, térmicas e químicas influenciam diretamente o desempenho da mistura (NEVILLE, 2016).

Já na NBR 12655 (ABNT, 2015), os requisitos básicos para composição de concreto e escolha de materiais que o compõem devem satisfazer as exigências estabelecidas tanto para o estado fresco quanto para o endurecido, considerando: “consistência, massa específica, resistência, durabilidade, proteção das barras de aço quanto à corrosão e o sistema construtivo escolhido para a obra”. A dosagem de concreto deve minimizar a segregação no estado fresco, considerando operações de mistura, transporte, lançamento e adensamento.

Para a durabilidade de uma estrutura, é preciso contar com características em termos de sua microestrutura e as propriedades físico-químicas. Helene (1983) propôs a classificação da durabilidade dos concretos em relação às propriedades físico-químicas, conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação da durabilidade do concreto em relação à porosidade e absorção de água

Grade	Qualidade do Concreto	Características do Concreto				
		Fresco		Endurecido		
		Água/cimento (kg/kg)	Teor de ar (%)	Teor de ar incorporado (%)	Absorção de água (%)	Penetração de água (mm)
α	Baixa compacidade	$\geq 0,60$	$\leq 2,0$	$\leq 3,0$	Qualquer	Qualquer
β	Normal	0,50 a 0,59	$\leq 2,0$	$\leq 3,0$	$\leq 5,0$	Qualquer
γ	Alta compacidade	0,45 a 0,49	$\leq 1,5$	$\leq 3,5$	$\leq 4,5$	≤ 80
δ	Impermeável	$\leq 0,44$	$\leq 1,0$	$\geq 2,0$ a $\leq 4,0$	$\leq 4,3$	≤ 40

Fonte: Helene, 1983, p.81.

Definida a Tabela 1, o autor relacionou as propriedades à sua aplicação ou probabilidade de emprego, mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Aplicação do concreto com relação à agressão ambiental

Grade	Intensidade de Agressividade	Concreto adequado
0	Nula	$\alpha\beta\gamma\delta$
I	Fraca	$\beta\gamma\delta$
II	Média	$\gamma\delta$
III	Forte	δ
IV	Muito forte	Adoção de elementos especiais para proteção do concreto

Fonte: Helene, 1983, p. 85.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) também salienta que estruturas distintas podem ter necessidade de concretos com composições especiais, uma vez que se considera além dos passivos deteriorantes, o ambiente como um todo.

2.2 VULNERABILIDADE DO CONCRETO EM RELAÇÃO AO FATOR AMBIENTE: DURABILIDADE, VIDA ÚTIL E DESEMPENHO

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), o conceito de durabilidade é a capacidade de uma estrutura resistir às influências ambientais definidas ou previstas no projeto estrutural durante sua elaboração. A referida norma também cita que estruturas de concreto devem ser construídas sob a perspectiva da relevância dos fatores internos e externos a respeito da vida útil, conservando durante o tempo definido a segurança, estabilidade e aptidão à durabilidade. Ou seja, leva-se em consideração a capacidade de resistir às intempéries, aos processos químicos, desgaste e outros processos deteriorativos, inclusive a própria deterioração do material.

Gaspar (1988), por sua vez, define durabilidade como a capacidade de *“manter em serviço e com segurança uma estrutura, durante um tempo especificado ou período de vida útil em um determinado meio ou entorno, mesmo que este meio seja desfavorável ao concreto”*. O autor acrescenta que a durabilidade de uma estrutura de concreto armado é função de uma série de fatores relacionados com a qualidade do concreto e sua interação com o ambiente externo.

Por vida útil de projeto, a NBR 6118 (ABNT, 2014) descreve como: *“período de tempo durante o qual se mantém as características estruturais de concreto sem intervenções significativas”*. Entretanto, deve-se salientar que este conceito se aplica à estrutura como um todo ou partes isoladas e desta forma determinadas partes podem requerer cuidados especiais com tempo de vida útil diferentes.

Freire (2005) relata que a espessura do cobrimento da armadura contribui para o controle da movimentação de íons agressivos ao interior da estrutura, de forma que, quanto maior a espessura do cobrimento, maior o intervalo de tempo para que as concentrações de íons atinjam a armadura. Assim, a qualidade do concreto, a baixa penetrabilidade e a espessura do concreto agem em conjunto, protegendo a estrutura.

Aliada à NBR 6118 (ABNT, 2014), a NBR 15575 (ABNT, 2013) trata do quesito de desempenho de edificações. A avaliação de vida útil de projeto é parte crucial, pois a avaliação de uma edificação vai depender da correta definição em projeto de materiais, componentes, elementos e sistemas que desempenharão suas funções, bem como da correta utilização dos mesmos pelo usuário e da execução das manutenções previstas. A Tabela 3 demonstra níveis de vida útil de projeto para sistemas e elementos, sendo que a classificação da descrição (substituível, manutenível e não manutenível) impacta na vida útil exigida.

Tabela 3 - Vida útil para sistemas e elementos

Categoria	Descrição	Vida útil	Exemplos típicos
1	Substituível	Vida útil mais curta que o edifício, de substituição fácil e prevista em projeto.	Pisos, louças e metais sanitários
2	Manutenível	Duráveis, porém necessitam de manutenção periódica e são passíveis de substituição ao longo da vida útil do edifício.	Fachadas e janelas
3	Não manutenível	Devem ter a mesma vida útil do edifício por não possibilitar manutenção.	Fundações e elementos estruturais

Fonte: NBR 6118, p. 16. (ABNT, 2014).

Considerando mecanismos de deterioração sob os aspectos físico-químicos, tem-se a agressividade do ambiente que atua sobre as estruturas, independentes das ações mecânicas, térmicas, hidráulicas e outras já previstas em projeto. Dessa forma, a Tabela 4 ilustra as classes de agressividade ambiental, estabelecidas pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Tabela 4 - 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 Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana ^{a. b.} Marinha ^{a.}	Pequeno
III	Forte	Industrial ^{a. b.}	Grande
IV	Muito forte	Industrial ^{a. c.} Respingos de maré	Elevado

Fonte: NBR 6118, p. 17. (ABNT, 2014), adaptada pelo usuário

Seguindo as normas que abordam a durabilidade de estruturas de concreto, como a indiana e a australiana (IS 456; AS3600), a classificação da norma brasileira considera diferentes níveis de agressividade, sendo que, através dessa separação são pautadas características que visam a durabilidade das estruturas. Em relação ao cobrimento do concreto, de acordo com os elementos estruturais e as classes de agressividade ambiental, a NBR 6118 (ABNT, 2014) recomenda, de acordo com a Tabela 5, valores mínimos de cobrimento nominal

Tabela 5 - Cobrimento nominal, em mm, de acordo com a agressividade ambiental

Tipo de Estrutura	Componente ou elemento	Classe de Agressividade				
		I	II	III	IV	
			Cobrimento Nominal (mm)			
Concreto armado	Lajes	20	25	35	45	
	Pilar/vigas	25	30	40	50	
	Elementos estruturais em contato com solo	30		40	50	

Fonte: NBR 6118, p. 20. (ABNT, 2014)

Ainda em relação ao cobrimento, a norma alemã DIN 1045 define as espessuras de acordo com o mecanismo de deterioração, conforme ilustra a Tabela 6.

Tabela 6 – Cobrimentos DIN 1045 em mm segundo classes de exposição

Cobrimentos segundo a DIN 1045 (mm)													
Tipo de Ataque	Corrosão induzida por carbonatação				Corrosão induzida por cloretos			Corrosão induzida por cloretos da água do mar			Pavimentos com desgaste por abrasão e com armaduras		
Classe de Exposição ¹	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3	XM1	XM2	XM3
Concreto armado	20	35	35	40	55	55	55	55	55	55	45	50	55
Concreto protendido	30	45	45	50	65	65	65	65	65	65	55	60	65

Fonte: DIN 1045, p. 04, 2001.

Desta forma, ao se comparar as normas alemã (DIN 1045) e brasileira (NBR 6118) (Tabelas 5 e 6) pode-se notar que na norma brasileira os ambientes de agressividade forte e muito forte variam o cobrimento entre 35mm e 50mm enquanto a norma europeia estabelece 55mm para as mesmas categorias, ou seja, um cobrimento maior para uma agressividade equivalente.

Além disso, cabe destacar que a norma alemã não apenas considera escalas de deterioração nas classes, como já indica qual o fenômeno que estará agindo sobre a estrutura, classificando de acordo com o agente de maior agressividade entre os presentes. Em oposição a isso, a norma brasileira expõe características ambientais, através dos quais pode-se presumir qual o mecanismo preponderante de deterioração (PACHECO, 2016)

A DIN 1045 teve a intenção de levar o padrão de concreto alemão até o estado da arte. Ela contém uma estratégia de especificação e projeto consistentes - variando de concreto armado e não armado convencional para concreto protendido - e também se aplica ao concreto estrutural leve. Abrange as especificações para os materiais de construção, a composição e produção do concreto, a execução de obras e a avaliação de conformidade, conforme ilustra a Tabela 7 (GRUBE, KERKHOFF, 2016)

¹ XC1: Seco ou permanentemente úmido; XC2: Úmido, raramente seco; XC3: Umidade moderada; XC4: Ciclicamente úmido e seco; XD1: Umidade moderada; XD2: Úmido, raramente seco; XD3: Ciclicamente úmido e seco; XS1: Ar transportando sais marinhos; XS2: Submersão permanente; XS3: Zona de maré e rebentação; XM1: Desgaste moderado; XM2: Desgaste severo; XM3: Desgaste muito severo.

Tabela 7 – Estratégias e Critérios segundo a DIN 1045

Design estratégico	Critério
Estratégia descritiva	- Vida útil média é definida - Efeitos são definidos (classes de exposição) - despesas normais de manutenção - a composição do concreto e as regras de execução são estabelecidas por regulamentos técnicos
Estratégia de desempenho	- A vida útil de serviço é escolhida para atender aos requisitos de projeto; - O custo da manutenção é avaliado - Desenvolvimento com tempo do ataque e resistência são calculados - A vida útil calculada é determinada com base no padrão comportamental do ataque e resistência e definida com mais precisão por probabilidades de falha - Verificação

Fonte: GRUBE, KERKHOFF, 2016.

2.2.1 Efeitos da Ação do Ambiente

O nível de agressividade na região onde a edificação será construída determinará as características do concreto e da estrutura. Por exemplo, uma estrutura localizada em uma área rural terá risco de deterioração insignificante, dada a inexistência de mecanismos de dano no local, mas, se estiver no litoral e receber respingos da maré, o risco passará a ser elevado (NBR 6118:2014).

Em relação ao contato do concreto com substâncias ácidas, apesar de não ser habitual, ocorre na presença de chuvas ácidas nos grandes centros e nas áreas industriais, ou ainda, em relação a agressividades específicas de ambientes industriais. Os ácidos sobre o concreto atuam destruindo seu sistema poroso e produzindo uma transformação completa na pasta de cimento endurecida. O resultado destas ações é a perda de massa e uma redução da seção do concreto. Esta perda acontece em camadas sucessivas, a partir da superfície exposta, sendo a velocidade da degradação proporcional à quantidade e concentração do ácido em contato com o concreto (ANDRADE, 2003).

Já nas edificações em ambiente marinho, considerado agressivo, acaba configurando-se como altamente inóspito para os materiais de construção. A água do mar é agressiva ao concreto porque possui gases (na superfície da água ou dissolvidos) e íons corrosivos, organismos marinhos, além de produzir impactos devido às ondas, e transformações devido à cavitação, à abrasão e à erosão. A pressão da água, juntamente com temperaturas extremas, são fatores que aceleram

esse processo de deterioração, comprometendo a durabilidade da estrutura de concreto (MEHTA, 1992).

Almeida e Sales (2014) relatam que, assim como do dióxido de carbono e a presença de umidade reduzem a alcalinidade do concreto, outras soluções ácidas provocam efeitos similares. Geralmente, as soluções ácidas podem ser encontradas em águas contaminadas com dejetos industriais ou até mesmo a própria atmosfera industrial. Dentre as soluções ácidas encontradas neste tipo de ambiente pode-se citar ácidos clorídrico, sulfúrico e nítrico. Já os ácidos acético, fórmico e láctico se fazem presentes em indústrias alimentícias, na agricultura e indústrias de fertilizantes encontram-se cloreto de amônia e sulfato de amônia. A velocidade de ataque na matriz de cimento depende da solubilidade de sais solúveis formados após a dissolução dos componentes da pasta de cimento e assim, a velocidade do ataque está ligada à natureza de íons presentes na solução ácida, através da troca catiônica.

Lima e Morelli (2005) caracterizam a agressividade do ambiente urbano através de suas características de concentração populacional, uma vez que trazem consigo alterações do meio original. Essas alterações, quando se estuda a degradação das construções, em especial das estruturas de concreto, incluem a ocorrência de chuvas ácidas, deposição de partículas sólidas e lançamento de dióxido de carbono na atmosfera, responsável pela carbonatação dos concretos e consequente corrosão das armaduras. Além desses aspectos, cabe salientar que o meio urbano provoca alterações no regime de ventos, pela criação de corredores de vento, onde se tem alteração nas características de chuva dirigida, em especial nos centros, mais densos, além da alteração da distribuição de temperaturas.

Os efeitos da temperatura no concreto podem ter origem tanto externa como interna. Do ponto de vista externo, as condições climáticas, como o frio e calor, junto com a umidade do ar e ventos, podem provocar problemas no concreto (ABRAMS, 1971). Do ponto de vista interno, o calor gerado pela hidratação do cimento é um dos mais importantes causadores de manifestações patológicas.

2.3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DO CONCRETO

O termo patologia, na engenharia civil, possui a mesma definição dada pela área de saúde. Patologia em estruturas pode ser utilizado quando há perda ou

queda de desempenho de um produto ou componente da estrutura, sendo alusivo a identificação de um processo de deterioração, como uma doença na área da saúde. (ANDRADE e SILVA, 2005).

As manifestações patológicas em estruturas ocorrem de diversas formas, como fissuras, que são comuns em estruturas de concreto e podem desencadear a corrosão da armadura. Geralmente, as fissuras são oriundas de um concreto frágil, com pouca resistência à tração e podem ser simples ou complexas, a depender do local e abertura de sua ocorrência (CÁNOVAS, 1988; BONIC et al, 2015).

As manifestações patológicas apresentam-se nas mais variadas formas, tendo causas variadas. No que concerne à origem do problema, pode ser classificada como congênita (oriundas da fase de projeto), construtivas, acidentais ou adquiridas – ao longo da vida útil da edificação. Carvalho (2013) define patologia como sendo o “conjunto de manifestações, que ao longo da vida útil de determinado edifício prejudicam o seu desempenho”.

Andrade (1997) explica que a importância do estudo da patologia das construções está na necessidade de divulgação das manifestações patológicas mais incidentes e no conhecimento da evolução dos problemas, os quais o quanto antes forem detectados, menores serão os custos para manutenção dos elementos danificados.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) trata dos mecanismos preponderantes de deterioração do concreto e da armadura, sendo:

- a) **lixiviação:** é o mecanismo que dissolve e carrega os compostos hidratados da pasta de cimento através da ação de águas puras, carbônicas agressivas, ácidas e outras. A referida norma recomenda restrição de fissuração a fim de evitar ou minimizar a infiltração de água de forma a proteger as superfícies em exposição;
- b) **expansão por sulfato:** é a degradação do concreto em consequência de reações químicas entre o concreto e íons de sulfato de uma fonte externa, podendo se manifestar de duas formas distintas: pela expansão do concreto ou pela perda progressiva de resistência e perda de massa. A expansão do concreto provoca sua fissuração e o consequente aumento da permeabilidade e da fragilidade para a penetração de águas agressivas;
- c) **reação álcali-agregado:** manifesta-se pela expansão e fissuração do concreto, com perda de resistência, elasticidade e durabilidade. As reações denominadas álcali-agregado ou álcali-sílica envolvem íons alcalinos do cimento, íons hidroxila e certos constituintes silicosos que podem estar presentes no agregado;
- d) **despassivação por carbonatação:** se constitui pela ação do gás carbônico presente na atmosfera sobre o aço da armadura. Como medida protetiva, recomenda-se dificultar a entrada de agentes agressivos no interior do concreto. O cobrimento das armaduras e o controle de fissuras são essenciais, além do uso de concreto de baixa porosidade;

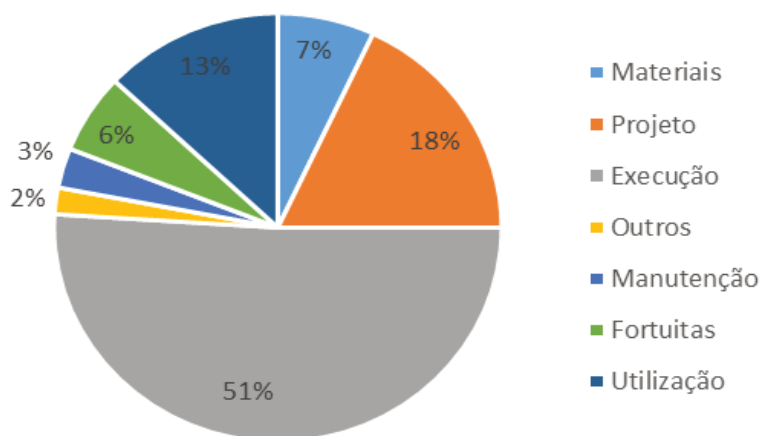
e) despassivação por ação de cloretos: se caracteriza pela ruptura local da camada de passivação causado pela alta concentração de íon-cloro, sendo recomendado como medida preventiva o uso de concreto de baixa porosidade, adição de escória, cobrimento de armaduras e controle de fissuração.

Ainda, tem-se a abrasão, que é o desgaste de uma superfície. Amorim (2010) relata que a superfície do concreto é suscetível ao desgaste por algum agente abrasivo e acarreta na perda de material no local e, conseqüentemente, menor desempenho mecânico.

Já quando se trata da corrosão, geralmente há presença de água ou material fluído, que penetra nos poros do sólido. A quantidade de água é, na maioria das vezes, determinante para a mensuração da corrosão ou processo corrosivo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Silva e Jonov (2011) apontam que as principais causas do surgimento dessas manifestações são as falhas humanas, principalmente, na fase de execução, conforme ilustra o Gráfico 1.

Gráfico 1 - Manifestação patológica de acordo com as fases de projeto.



Fonte: Silva e Jonov (2011)

Araújo (2015) elaborou um Fluxograma que mostra a deterioração do concreto através dos processos físico-químicos, apresentado na Figura 02.

Figura 2 - Deterioração do concreto por processo físico-químico



Fonte: Araújo (2015)

Em termos da carbonatação, percebe-se influência direta do teor de CO₂, e diante disso, avalia-se a agressividade do ambiente e consequente dano nas estruturas de concreto armado.

2.3.1 Carbonatação

A corrosão é um processo de deterioração causado pela interação entre o material e o meio ambiente, através de uma reação química ou eletroquímica. Esse processo de deterioração causa a perda da seção da barra de aço e a formação de produtos expansivos. Para que haja o início da corrosão é determinante a despassivação da armadura, o que ocorre frente a pelo menos uma das duas condições básicas seguintes: presença de quantidade suficiente de íons cloretos ou diminuição da alcalinidade do concreto, esta última causada, principalmente, pelas reações de carbonatação do concreto (MONTEIRO, PEREIRA, 2011; MEDEIROS JR et al, 2015).

Carmona (2005), através de um estudo que verificou a despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação, constatou que a fissuração e umidade têm influência direta na profundidade da carbonatação. Em

relação à umidade, foi concluído que a profundidade de carbonatação foi menor em áreas de infiltração, contudo foi observada a existência de corrosão de armaduras. O autor concluiu que, no objeto de estudo, o baixo controle de qualidade foi fundamental para a variabilidade elevada de profundidade de carbonatação, que se encontrou bem superior aos valores bibliográficos.

Cascudo (1997) salienta que a armadura inserida no interior do concreto encontra-se em um estado passivo em detrimento à corrosão, devido a uma fina camada de óxido formada pelo meio altamente alcalino, propiciado pela solução dos poros do concreto. Em síntese, o fenômeno consiste em um processo físico-químico entre o gás carbônico (CO_2) presente no ar e os produtos da hidratação do cimento, transformando íons alcalinos em carbonatos, como apresenta a equação 01.

$$ec = kc\sqrt{t}$$

Equação 01

Onde:

ec = espessura ou profundidade carbonatada;

kc = coeficiente de carbonatação. Função da difusividade do CO_2 , do gradiente de concentração do CO_2 e da quantidade retida de CO_2 ;

t = tempo de exposição.

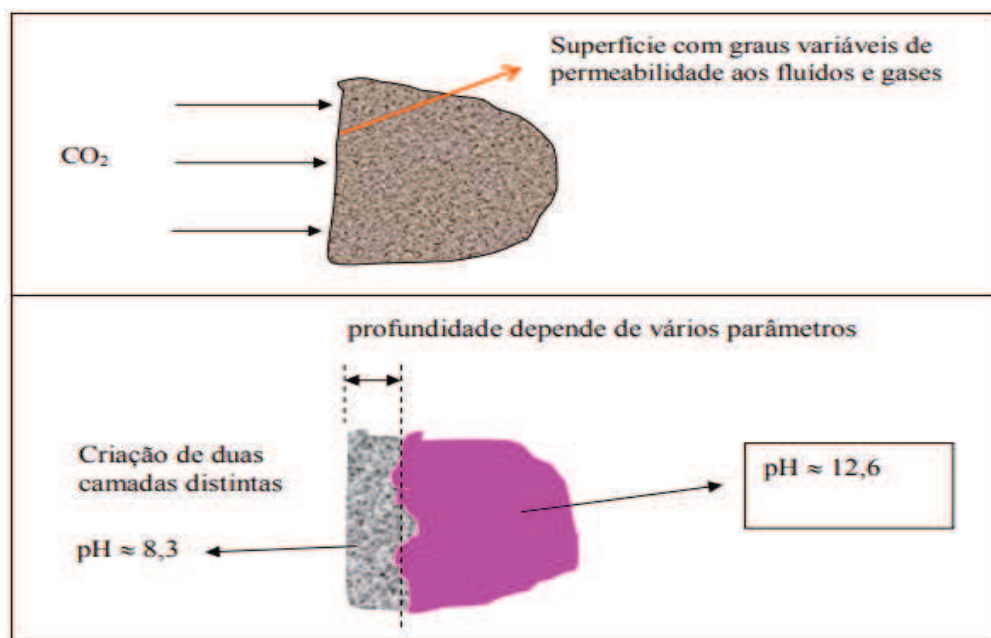
A avaliação da resposta de um concreto ao fenômeno da carbonatação pode ser realizada de forma natural, com a exposição do material ao meio ambiente. Porém, dessa forma, o teor de CO_2 a que o concreto está exposto é bem menor do que em uma situação controlada, aumentando consideravelmente o tempo de ensaio e muitas vezes inviabilizando a pesquisa. Conforme Helene (1993), a concentração de CO_2 no meio ambiente é de 0,03% em ambientes rurais, podendo chegar a 1,8% em ambientes industriais específicos.

Uma das consequências é a redução do potencial hidrogeniônico (pH) da solução do poro em virtude da liberação de íons de hidrônio (H_3O^+), e em decorrência, ocorre a desestabilização da camada passivadora.

De acordo com Libório (1998), na carbonatação o que se tem é um gás dissolvido em película úmida que reage com um álcali em solução, e não um gás reagindo com material sólido. As medidas são realizadas relacionando o pH da fase líquida em equilíbrio com a massa sólida – há a necessidade de um poro líquido

onde o CO_2 possa estar dissolvido. O autor ilustra na Figura 3 o processo de carbonatação.

Figura 3 - Esquema da ação da carbonatação



Fonte: Libório, 1998, p. 29.

Passos (2017) relata que a carbonatação gera o carbonato de cálcio (CaCO_3), que pode ser acumular, sobretudo nas juntas de assentamento dos blocos, de revestimentos cerâmicos ou em fissuras em estruturas de concreto. O carbonato de cálcio é produto da reação do hidróxido de cálcio, presente nos blocos e argamassas de cimento, com o dióxido de carbono presente na atmosfera e na água. A autora afirma que, do mesmo modo que na eflorescência, a eliminação total das fontes de umidade extingue o problema, uma vez que a presença de água é essencial para que ambas reações ocorram.

Salomão e Silva (2008) determinaram que, se tratando de vida útil de estruturas de concreto armado, a carbonatação é um fenômeno importante a ser estudado, entretanto ainda não existe norma que regulamente os ensaios de carbonatação. Existem câmaras climatizadas onde é possível a realização de ensaios acelerados com total controle das variáveis, mas o custo é elevado e somente poucos laboratórios têm potencial para a aquisição.

Em relação ao monitoramento das estruturas, cabe destacar que a mensuração da frente de carbonatação é uma análise simples e de custo reduzido. Para tal, corriqueiramente emprega-se a análise colorimétrica, onde se utiliza o

reagente fenolftaleína nas amostras. A cor rosa ou carmim indica concreto são, enquanto incolor indica material carbonatado (SALOMÃO E SILVA, 2008).

2.4 MODELOS TEÓRICOS DE PREVISÃO DA VIDA ÚTIL

Shimomukay (2011) relata que uma grande parcela da comunidade científica está empenhada em estabelecer parâmetros adequados para dados de modelagem sobre diversos fenômenos de deterioração em estruturas de concreto e a intenção baseia-se na obtenção de dados de vida útil cada vez mais precisos. É comum perceber a realização de estudos que buscam modelos teóricos para estimar fenômenos de ocorrência nas estruturas de concreto, porém, deve haver cuidado em seu emprego ou para que possam ser extrapolados.

Van der Toorn (1994) *apud* Andrade (2005) relata que os modelos que tentam prever a vida útil de uma estrutura atingida por mecanismos degradativos devem fornecer informações suficientes para que sejam avaliadas as mudanças que ocorrem ao longo do tempo e deve-se levar em conta o meio no qual a estrutura está inserida. Dessa forma, tem-se que o ideal seria contar com um modelo baseado em curvas de degradação que aumentam ou diminuem ao longo do tempo e das variações dos componentes.

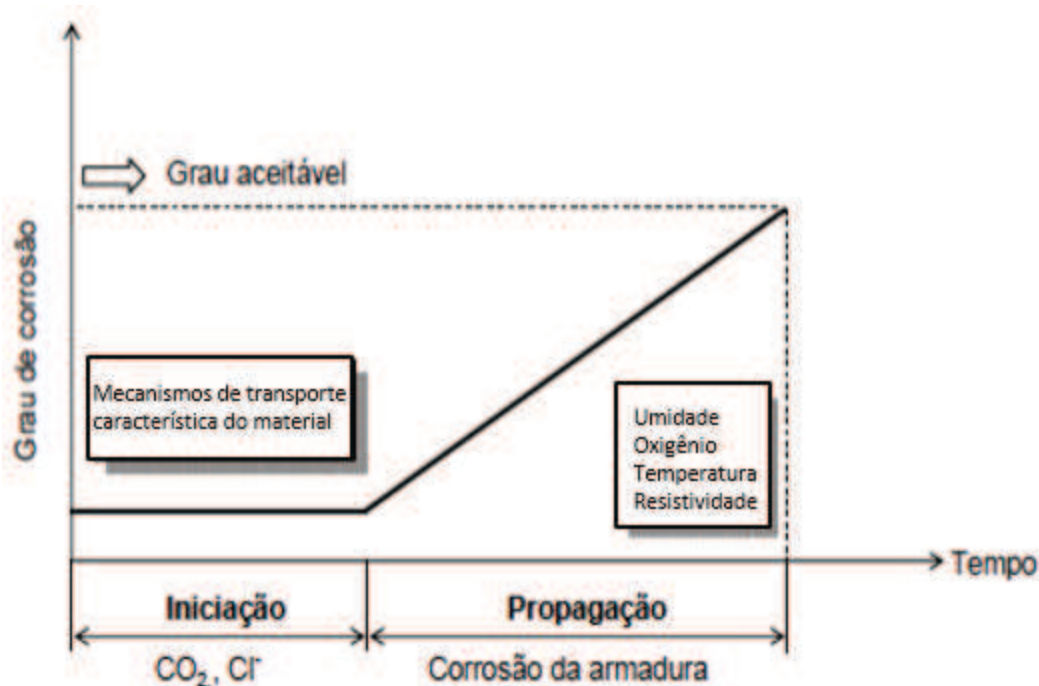
Já Helene (1997) baseia um dos seus modelos de previsão de vida útil na abordagem de experiências anteriores, ideia que se baseia na adoção de limites máximos aceitáveis para a relação água/cimento e limites mínimos em relação às propriedades mecânicas. O autor também salienta a abordagem determinística, caracterizada pela consideração da qualidade do concreto, parâmetros de permeabilidade, absorção capilar, difusão e migração de gases e íons e tamanho do percurso até o agente agressivo atingir a armadura em concentração suficiente para causar danos.

Além destas teorias, ainda há as abordagens baseadas em ensaios acelerados, que possuem a finalidade de determinar um fator que relacione a degradação obtida em laboratório com os resultados de inspeção do dano no componente quando exposto às condições naturais. Outra forma de abordagem é a probabilística, pois vários problemas da construção civil acontecem de forma aleatória, e não se pode considerar determinados parâmetros como constantes,

desta forma, algumas decisões são tomadas baseadas na incerteza, ou seja, na probabilidade de ocorrência.

Tuutti (1982) *apud* Ribeiro (2014) relata que a criação de modelos de previsão de vida útil de estruturas em concreto é de extrema importância para o entendimento dos mecanismos de degradação. O autor salienta que o modelo a vida útil de uma estrutura, sob o ponto de vista da corrosão, é dividido em dois períodos: o de iniciação da corrosão e o de propagação. O período de iniciação é o tempo em que os agentes agressivos levam para atravessar o cobrimento, atingindo a armadura e provocando sua despassivação. Durante a propagação, a deterioração evolui até tornar-se inaceitável. A Gráfico 2 esquematiza o modelo de Tuutti.

Gráfico 2 - Representação esquemática adaptada do modelo de Tuutti.



Fonte: Tuutti, 1982 *apud* Ribeiro, 2014.

Os casos com métodos determinando a vida útil de projeto (VUP) com ensaios não destrutivos e semi-destrutivos servem para estimar a vida útil residual de estruturas de concreto armado, com a introdução na linha de pesquisa por Tuutti (1982), com a determinação da vida útil residual quanto à frente de carbonatação e a idade da amostra. Carmona (2005) utilizou modelos de previsão de carbonatação tomando por base as equações:

$$\frac{C_x - C_1}{g\left(\frac{k_{CO_2}}{2} \sqrt{D_{CO_2}}\right)} + C_x - C_2 = 0 \quad (1)$$

$$g\left(\frac{k_{CO_2}}{2} \sqrt{D_{CO_2}}\right) = \sqrt{\pi} \frac{k_{CO_2}}{2\sqrt{D_{CO_2}}} e^{\frac{k_{CO_2}^2}{4D_{CO_2}}} \operatorname{erf} \frac{k_{CO_2}}{2\sqrt{D_{CO_2}}} \quad (2)$$

$$e = k_{CO_2} \sqrt{t} \quad (3)$$

Onde,

C_x = Concentração de CO_2 na descontinuidade (kg/m^3)

C_1 = Concentração de CO_2 no ar (kg/m^3)

C_2 = Concentração de CO_2 no material (kg/m^3)

K_{CO_2} = Coeficiente de carbonatação ($m/s^{1/2}$)

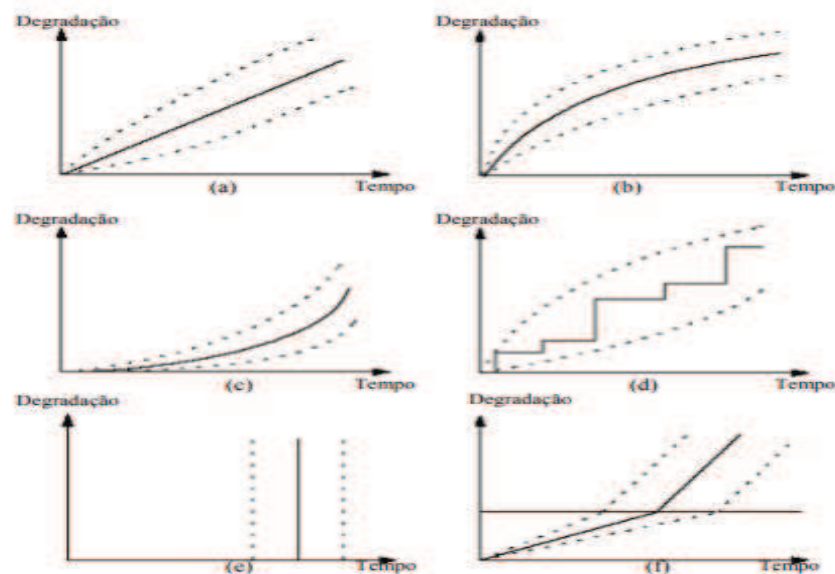
D_{CO_2} = Coeficiente de difusão do CO_2 (m^2/s)

X = Profundidade de carbonatação (m)

t = tempo (s)

Ribeiro (2014) relata que, além do modelo simplificado de Tuutti (1982), outro modelo genérico de estimativa de vida útil é o de Van Der Toorn (1992), onde é visto o processo de degradação de acordo com a forma e a intensidade de ocorrência, conforme Gráfico 3.

Gráfico 3 - Formas de degradação das estruturas de concreto armado.



Fonte: Van Der Toorn (1992) apud por Ribeiro (2014).

Assim, Ribeiro (2014) interpreta o gráfico 3 da seguinte maneira:

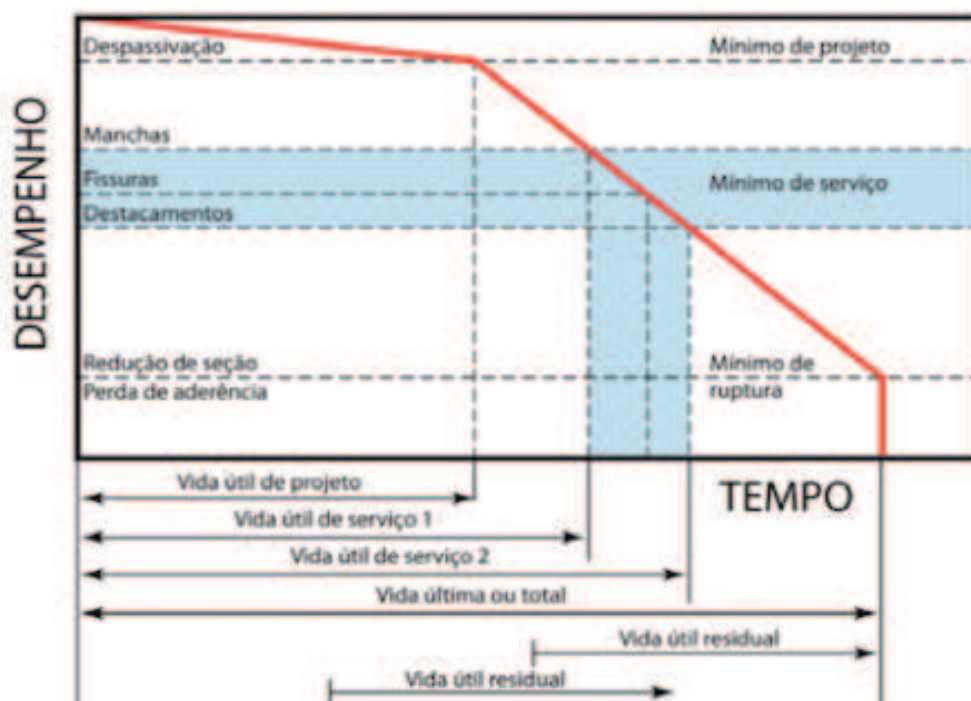
- a) o processo linear em função do tempo apresenta incerteza, visto que em determinados casos, o processo corrosivo pode configurar-se dessa forma;
- b) a penetração dos cloretos e de CO_2 pode ser modelada com a raiz quadrada do tempo com uma função erro;
- c) no processo por fadiga, a degradação tende a acelerar com o tempo, devido ao efeito acumulativo de cargas, segundo uma curva exponencial;
- d) as colisões são representadas por um processo descontínuo (etapas), representando o efeito de cargas extremas;
- e) um carregamento excessivo, não previsto em projeto, pode levar a estrutura ao colapso de forma súbita;
- f) processo que se assemelha ao modelo proposto por Tuutti (1982), caracterizado pelos estágios de iniciação e propagação.

Diante do exposto, Helene (1997) expressa sua estimativa de vida útil de forma global, subdividindo-a em:

- 1) vida útil de Projeto (a): na primeira etapa, também conhecida como etapa de iniciação, os agentes agressivos ainda estão em fase de entrada através da rede de poros do cobrimento e não causam danos efetivos, lembrando que a vida útil de projetos de ainda estruturas de concreto é de 50 anos;
- 2) vida útil de serviço (b): ocorre a manifestação dos primeiros efeitos dos agentes agressivos através de fissuras ou manchas provenientes de ataque químico e corrosão. A variação em função de cada caso torna difícil estimar a vida útil, pois enquanto algumas estruturas não demonstram algumas manifestações – manchas e eflorescências – outras só serão consideradas quando comprometerem a funcionalidade da estrutura;
- 3) vida útil total (c): diz respeito à ruptura ou colapso – parcial ou total – da estrutura. Nesta etapa a estrutura está condenada ou os gastos em reparos seriam exorbitantes;
- 4) vida útil residual (d): caracteriza-se por envolver parte das vidas úteis de serviço e total e corresponde ao período de tempo que uma estrutura será capaz de continuar funcional, contado após vistoria ou intervenção.

Desta forma, o Gráfico 4 ilustra o que foi exposto por Helene (1997).

Gráfico 4 - Relação desempenho *versus* tempo para determinação de vida útil.



Fonte: Helene (1997)

2.4.1 Modelos Teóricos de Previsão de Carbonatação

Pacheco (2016) elaborou uma tabela que exemplifica a síntese dos modelos teóricos de previsão de vida útil em relação à carbonatação, conforme ilustra a Tabela 8.

Tabela 8 - Modelos teóricos de previsão de vida útil em relação à carbonatação

Modelo	Variáveis de entrada	Modelo	Variáveis de entrada
Lei de Fick	Coefficiente de carbonatação Coefficiente de difusão de CO ₂ Gradiente de concentração de CO ₂ Quantidade retida de CO ₂ Tempo	Morinaga (1990)	Umidade relativa do ar Concentração de CO ₂ no ar Temperatura Relação água/cimento Tempo
Hamada (1969)	Tempo Relação água/cimento Tipo de cimento Tipo de agregados Superfície: uso ou não de aditivos químicos	Thomas e Matews (1992)	Umidade relativa do ar após desforma Período de cura Teor de cinza volante Resistência mecânica à compressão
Tuutti (1982)	Coefficiente de carbonatação Coefficiente de difusão de CO ₂ Concentração de CO ₂ no ar Concentração de CO ₂ no material Concentração de CO ₂ na descontinuidade ** A concentração de CO ₂ no material é dada pela concentração de O ₂ de acordo com a a/c.	CEB(1996)	Fator de cura Resistência mecânica à compressão Concentração de CO ₂ no ar Teor de CaO nos cimentos Tempo Tempo de cura Coefficiente de difusão de CO ₂ no concreto carbonatado
Sentler (1984)	Coefficiente de constituintes carbonatáveis Coefficiente de difusão de CO ₂ Diferença parcial de pressão de CO ₂ Tempo	Helene (1997)	Resistência mecânica à compressão Tempo Vida útil das estruturas Tipo de cimento
Ho e Lewis (1987)	Lei de fick e frente de carbonatação inicial	Jian, Lin, Cai (2000)	Umidade relativa do ar Quantidade de água Consumo de cimento Concentração de CO ₂ Grau de hidratação do cimento Tempo
Parrot (1987)	Permeabilidade do concreto em UR de 60% Conteúdo de CaO no cimento Umidade relativa do ar Tempo		
Ying-Yu e Qui-dong (1987)	Concentração e pressão de CO ₂ Quantidade de materiais carbonatáveis Coefficiente de difusão Quantidade de CO ₂ por volume de amostra	Izquierdo (2003)	Coefficientes de regressão e termos de erro Umidade relativa do ar Idade de concentração Relação água/cimento Tempo Tempo de cura Reserva alcalina
Bakker (1988)	Umidade relativa do ar Umidade da frente de evaporação Coefficiente de difusão do vapor de água Quantidade de água evaporada do concreto Água de gel Água dos poros capilares Quantidade de água no traço Grau de hidratação do cimento	Andrade (2004)	Resistividade elétrica Cobrimento da armadura em dada idade
Schiessl (1988)	Seção transversal da peça de concreto armado Diferença de concentração CO ₂ entre o ar e a estrutura Coefficiente de difusão de CO ₂ aos 90 dias Umidade relativa do ar		
Papadakis (1989 a 1992)	Concentração inicial de CO ₂ Coefficiente de difusão do CO ₂ Concentrações de CS, CSH, C ₃ S e C ₂ S Tempo Porosidade da pasta Massa molar de cada composto Fração em massa de clínquer no cimento Fração em massa de gesso no cimento		

Fonte: Pacheco, 2016, p.65.

Como se observa na Tabela 8, os modelos teórico-matemáticos de determinação de vida útil e carbonatação possuem diferentes abordagens, e buscam transpor resultados de carbonatação acelerada para a carbonatação natural. Na maioria dos modelos, os dados de entrada são muito específicos, como temperatura,

quantidade de hidróxido de cálcio, teor de argamassa do concreto, umidade relativa, e outras características que podem ser reproduzidas em laboratório. Mas quando a atuação se dá em campo, há uma dificuldade de utilização desses modelos. Por isso, o modelo simplificado da difusão de Tuutti (1982) tem ótima aceitação, pois, embora não seja tão preciso quanto outros modelos, tem a aplicação facilitada.

A forma proposta por Tuutti (1982) para expressar a profundidade carbonatada é em função da raiz quadrada do tempo, baseada na 1ª Lei de Difusão de Fick, de acordo com a Equação 4.

$$ec = kc\sqrt{t} \quad (04)$$

Onde,

ec = espessura ou profundidade carbonatada;

kc = coeficiente de carbonatação. Função da difusividade do CO_2 , do gradiente de concentração do CO_2 e da quantidade retida de CO_2 ;

t = tempo de exposição.

Cascudo e Carasek (2011) salientam que, em geral, muitos dos modelos existentes propõem um maior detalhamento do coeficiente kc da Equação 4, o qual resume a influência dos diversos fatores intervenientes da microestrutura da pasta e das condições de exposição do concreto. Desse modo, grande parte das equações sobre a modelagem do fenômeno parte do modelo simplificado proposto por Tuutti (1982) ou pode ser reduzida a ele.

Possan (2004) corrobora esta afirmação dizendo que, embora existam diversas formulações de previsão de vida útil, há grande entrave na validação das propostas, pois as variáveis envolvidas em um processo de aplicação de modelo teórico são muitas. A autora divide os modelos em empíricos e analíticos e ressalta que “modelos empíricos são baseados em ensaios de laboratório, enquanto os modelos analíticos são provenientes de inspeções em campo”, e assim, existe a necessidade de ajuste de modelos para, por fim, determinar a equação matemática que dê suporte aos estudos, sejam em campo ou controlados.

De acordo com Salomão e Silva (2008), o ensaio de carbonatação é um ensaio simples e indicador de potencial de corrosão um bom indicador de corrosão, tem um baixo custo e é parcialmente destrutivo, havendo necessidade de reparo

após o ensaio e varia conforme a qualidade do concreto e a exposição, medindo a profundidade da carbonatação. O indicador químico de fenolftaleína mantém-se incolor em soluções ácidas e torna-se cor-de-rosa em soluções básicas. A sua cor muda a valores entre pH 8,2 e pH 9,8. Podem ser empregados outros indicadores químicos, sendo o citado aquele que apresenta uso mais expressivo.

Capraro et al. (2015) acrescentam que o ensaio para determinação da profundidade da frente de carbonatação do concreto consiste na mensuração do pH em uma superfície do concreto recentemente fraturado, livre de pó, utilizando uma solução indicadora composta de fenolftaleína. Fenolftaleína é um indicador sintético que, ao se dissolver em água, se ioniza liberando H^+ e OH^- , que estabelecem um equilíbrio em meio aquoso. Quando se adiciona fenolftaleína em uma solução incolor, esta, ao entrar em contato com uma base ou ácido, muda de cor.

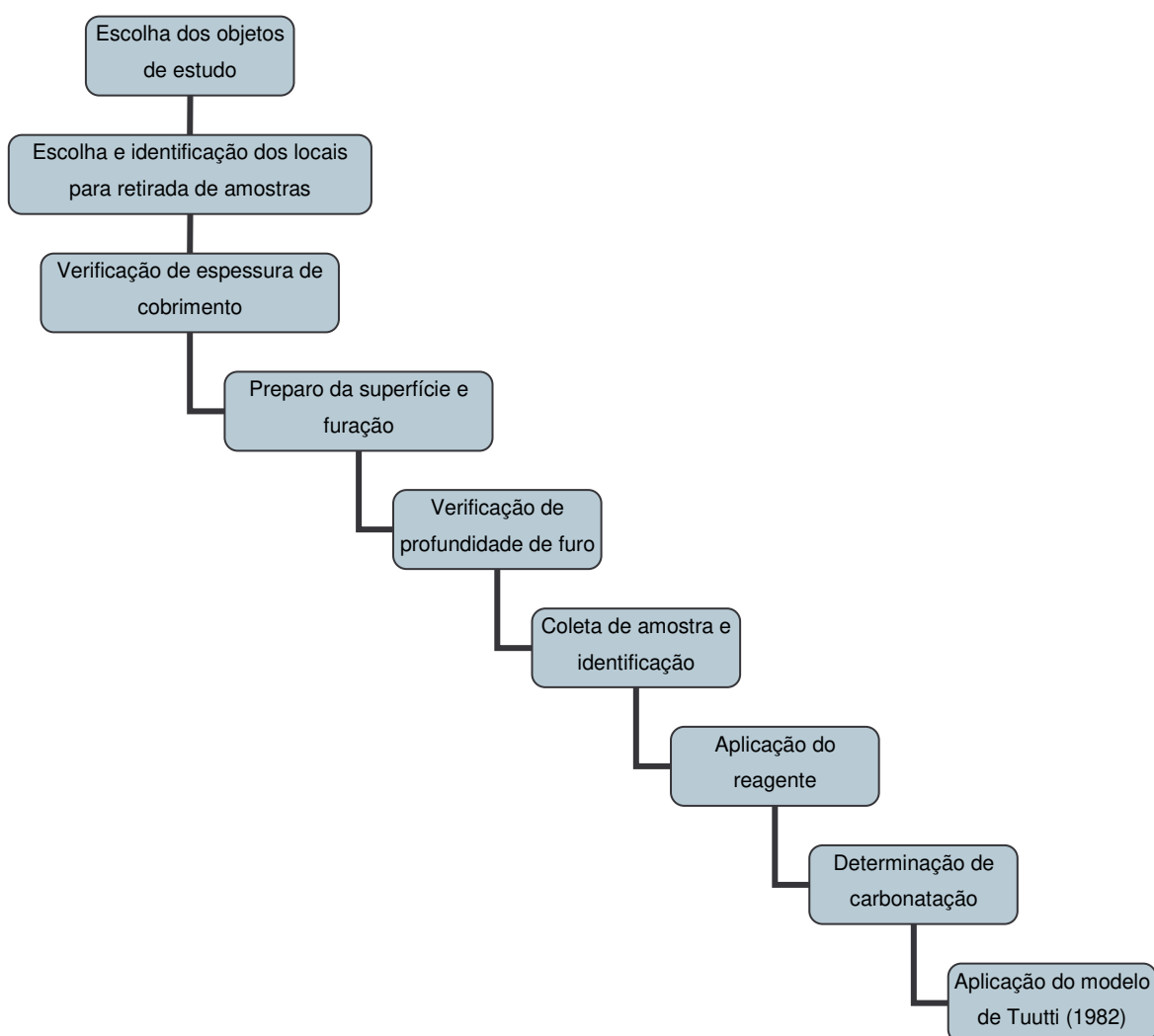
Medeiros Jr et al (2015) apresentam as demais técnicas que podem ser empregadas para tal fim, como os ensaios químicos de análise termogravimétrica (TGA), difração de raios-X (DRX), ensaio de espectroscopia no infravermelho com transformação de Fourier (FTIR), e ainda o ensaio de espectroscopia por ultrassom, salientando, no entanto, que tais técnicas, apesar de precisas e confiáveis, corriqueiramente exigem equipamentos, procedimentos demorados e são realizadas em laboratório. Assim, consolida-se o ensaio colorimétrico como o de uso predominante.

3 MÉTODO DE PESQUISA

3.1 ETAPAS DO ESTUDO

As etapas do presente estudo basearam-se na definição das edificações a serem analisadas, ensaio de avaliação de profundidade de carbonatação por colorimetria e aplicação de modelagem matemática para determinação de vida útil através do modelo proposto por Tuutti (1982), de acordo com a Figura 4.

Figura 4 – Etapas de campo



Fonte: A Autora

O método empregado nas três edificações é descrito no capítulo 3.3

Figura 6 – Fachada do edifício



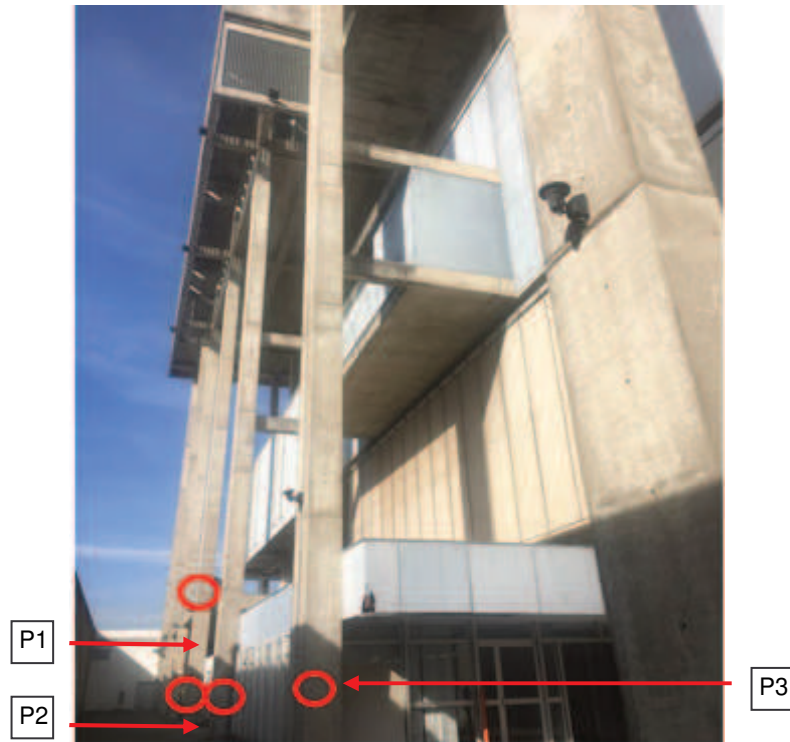
Fonte: A Autora

Como é possível observar pela Figura 5, a edificação localiza-se próxima a rodovias de elevado fluxo, inclusa a BR 116, além de estar localizada próximo ao acesso do aeroporto, e da rodovia BR 290, representando ponto de elevado fluxo de veículos.

A edificação tem data de projeto de 1969 e a execução da obra foi finalizada no ano de 1978. De acordo com o Fracalossi (2013), disponível no sítio ArchDaily, o projeto original teve como premissa a flexibilização dos espaços através de uma estrutura mista, em concreto e aço. Pelo corte original percebe-se que foi concebido para ter disposição de pavimentos mais aleatória, não como definitivamente construído: simétrico e escalonado. Na fachada percebe-se que o concreto empregado no local é aparente, característica relacionada ao movimento modernista. A definição do local de retirada de amostras para ensaio está ilustrada nas Figuras 7, 8 e 9. Ressalta-se que os pilares continuam até o subsolo, estando apenas marcadas as colunas na superfície.

Neste prédio, nos pontos de ensaio P1,P2,P3 e P6 havia um muro de proteção de 10m de altura. Os pilares P4 e P5 eram da fachada, sem proteção de intempéries e serviram de base para análise dos pontos ensaiados. A edificação têm 44 anos e os cobrimentos verificados variaram entre 24 e 42mm.

Figura 7 - Marcação de pilares para coleta de amostras - lateral



Fonte: A Autora.

Figura 8- Marcação dos pilares - frente da edificação, lado esquerdo



Fonte: A Autora

Figura 9 - Marcação dos pilares- frente da edificação, lado direito



Fonte: A Autora

A coleta foi realizada no dia 19 de junho de 2018, no período vespertino e clima ensolarado. As amostras foram coletadas a uma altura de 1,5m e uma amostra a 11,5m e nessa edificação, sendo que nessa edificação foram analisados 06 pilares. A amostra coletada a 11,5m visou identificar se havia influência da presença do muro de divisa da edificação.

3.2.2 Edifício Garagem Prédio 02

O Prédio 02 está localizado na Rua Mostardeiro, local de grande movimento no bairro Moinhos de vento em Porto Alegre, conforme ilustra a Figura 10.

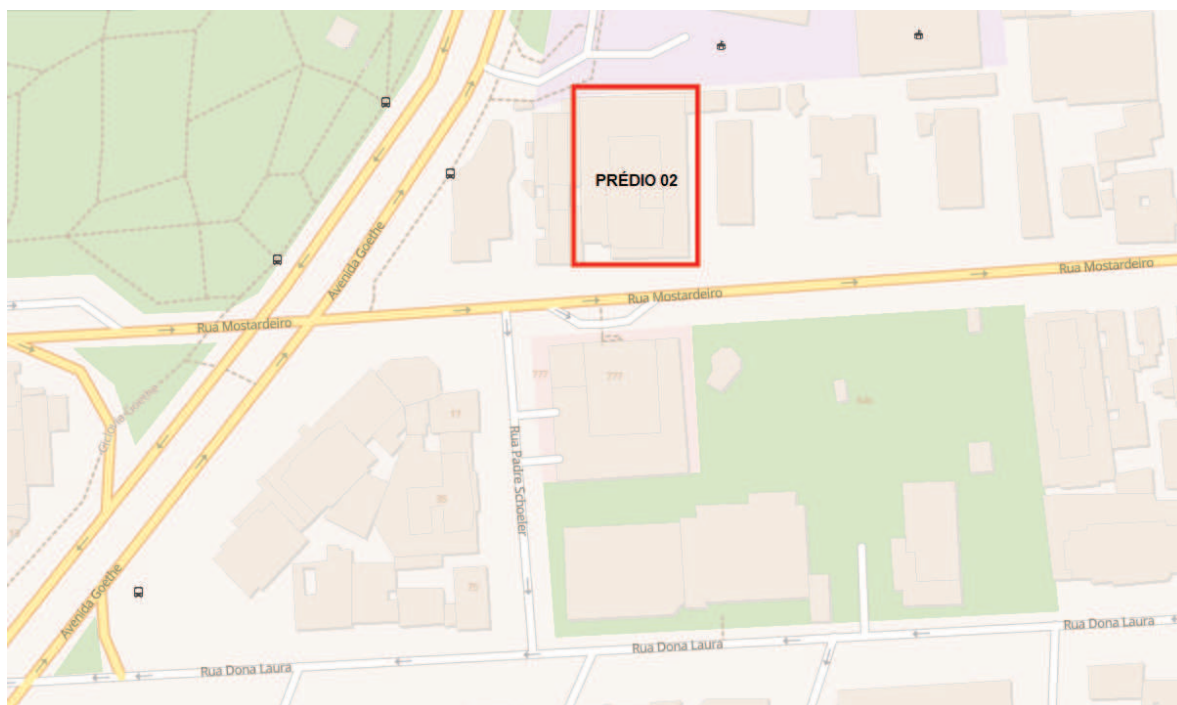
Segundo descrito em entrevista com o engenheiro Neimar Machado, o projeto do edifício foi desenvolvido no escritório da arquiteta Elizabeth Kleiman Pocztaruk, em 2000, contando com área construída de 8.353,46m². A construção da edificação durou 02 anos, sendo inaugurado no ano de 2002, totalizando 17 anos de uso.

A edificação contempla 11 pavimentos, sendo 1 subsolo, térreo, pavimento intermediário de estacionamento, 9 pavimentos de salas comerciais corporativas e

cobertura. Conta com 120 vagas de estacionamento e com uma rotatividade de 150 veículos por dia, sendo 100 mensalistas e 50 diárias, segundo relatos coletados pela administração no local da análise. A edificação tem 19 anos e os cobrimentos encontrados foram de 14 a 22mm.

A Figura 11 ilustra a fachada do edifício e as Figuras 12, 13 e 14 ilustram a área de garagem de onde foram tiradas as amostras para o ensaio de frente de carbonatação.

Figura 10 – Mapa de localização do Prédio 02



Fonte: A Autora

Figura 11 - Fachada – Prédio 02



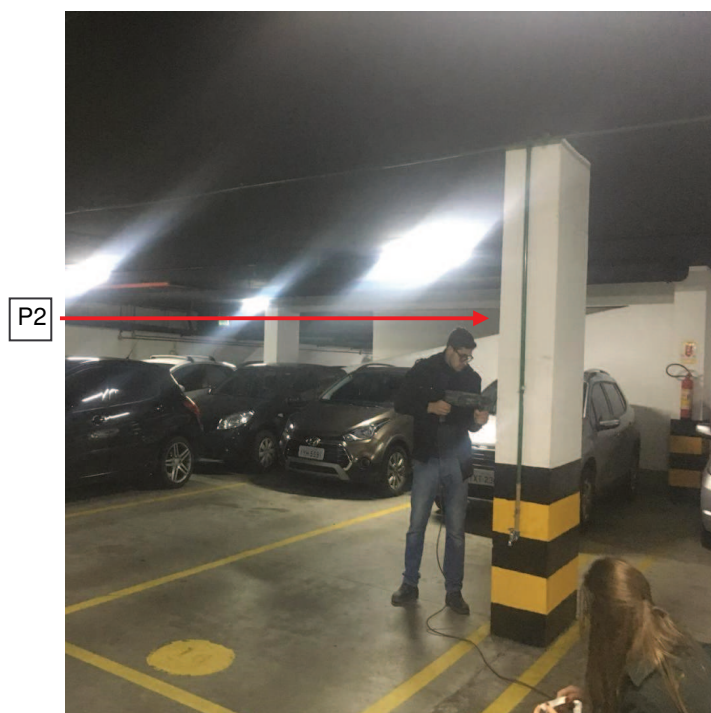
Fonte: A Autora

Figura 12 – Local de retirada de amostra na entrada



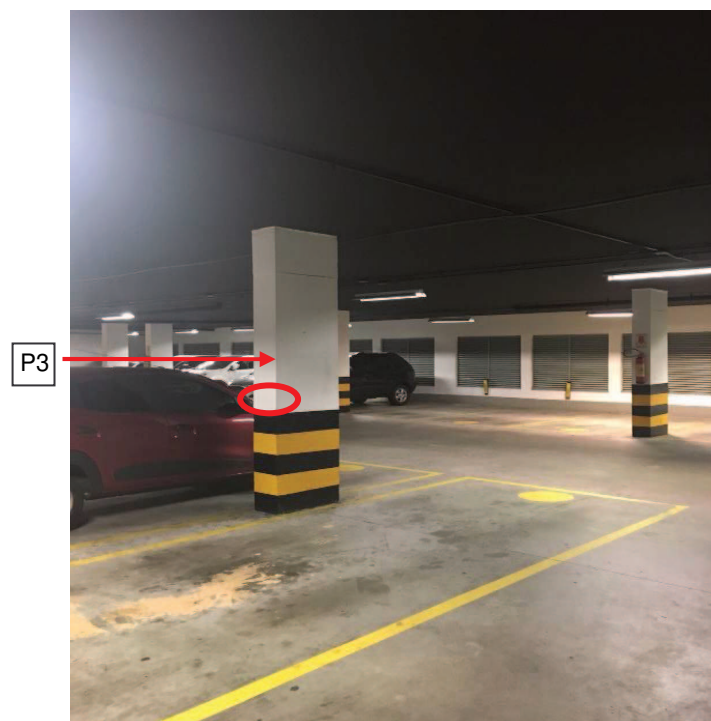
Fonte: A Autora

Figura 13 - Local de retirada de amostras



Fonte: A Autora

Figura 14 - Local de retirada de amostras



Fonte: A Autora.

A coleta de amostras foi realizada no dia 10 de julho no período da manhã em um dia ensolarado. Para análise, foram selecionados três pilares. Inicialmente, foi coletado material no pilar de entrada (P1) na Face A, entretanto, foi detectada a

presença de agregado graúdo no local da furação, o que poderia dificultar a análise em função da sua coloração, assim, o resultado foi desconsiderado, passando a ser analisada a face C. A coleta ocorreu com uma altura de 1,5m, mantendo o padrão da coleta no prédio 01.

3.2.3 Edifício Prédio 03

O Prédio 03 está localizado na Rua Mostardeiro, nº 777, na região do bairro Moinhos de vento, também na cidade Porto Alegre. Projetado por Baldosso e Oleff, em 2011, e construído no período de 2012 a 2015, foi inaugurado em abril de 2015.

A edificação contempla 16 pavimentos, sendo 1 subsolo, térreo, estacionamentos do segundo ao quarto andar e mais 11 pavimentos de salas comerciais corporativas. O mapa de localização está ilustrado na Figura 15. O edifício possui 164 vagas de garagem, entretanto 40% delas não são utilizadas. A idade da edificação é de 7,5 anos e os cobrimentos encontrados nos locais de amostragem variaram entre 15 e 31mm.

Figura 15 - Mapa de localização do Prédio 03.



Fonte: Google, 2018.

A Figura 16 ilustra a lateral do edifício e as Figuras 17 e 18 indicam de onde foram retiradas as amostras para ensaio.

Figura 16 - Vista Lateral Edifício.



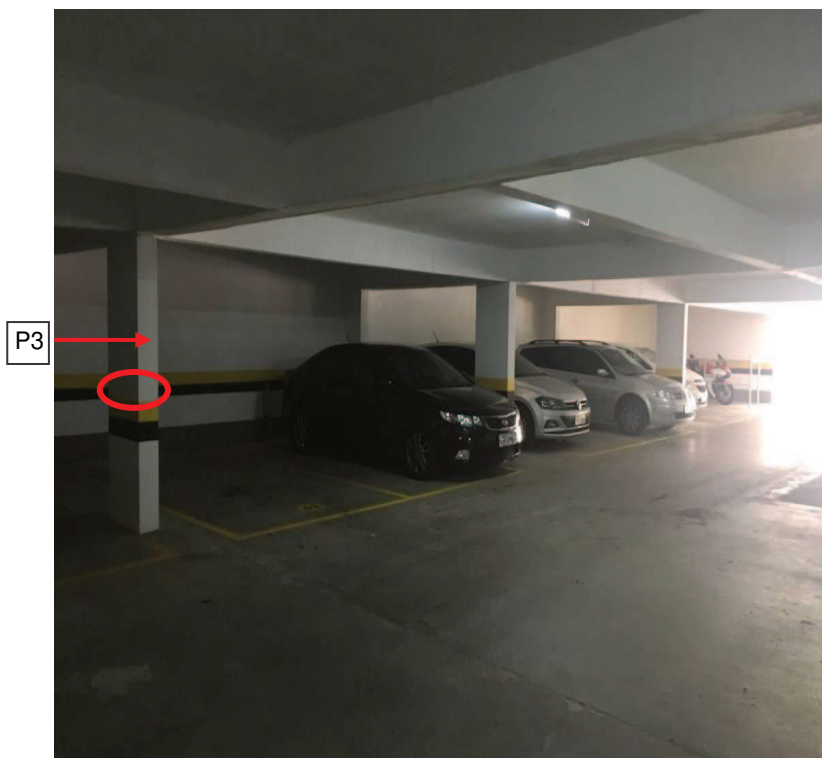
Fonte: A Autora.

Figura 17 - Local de retirada de amostras – garagem.



Fonte: A Autora.

Figura 18 - Local de retirada de amostras da garagem.



Fonte: A Autora.

A coleta de amostras do Prédio 03 foi realizada na mesma data e condições climáticas do edifício Prédio 02 (10 de julho) e foram analisados 03 pilares (P1, P2 e P3) para retirada de amostras. Novamente, manteve-se padrão de coleta das amostras a uma altura de 1,5m.

3.3 MÉTODOS

O método utilizado para a coleta de amostras e avaliação de manifestação patológica foi o mesmo para os três edifícios, mudando somente a profundidade de furo, conforme segue.

3.3.1 Método de Amostragem

Foram realizadas inspeções preliminares na edificação, com o intuito de identificar os locais para extração das amostras, visando a previsão de vida útil, segundo o modelo de Tuutti (1982), de acordo com a Equação 4, aplicada à frente de carbonatação.

$$X = k \times \sqrt{t}$$

Equação 4

Onde:

X = frente de carbonatação, em mm;

t = período de tempo referente à frente de carbonatação, em anos;

k = características de permeabilidade do concreto, possível absorção de CO_2 no concreto, e a concentração de CO_2 no ambiente, em $\text{mm/ano}^{0,5}$.

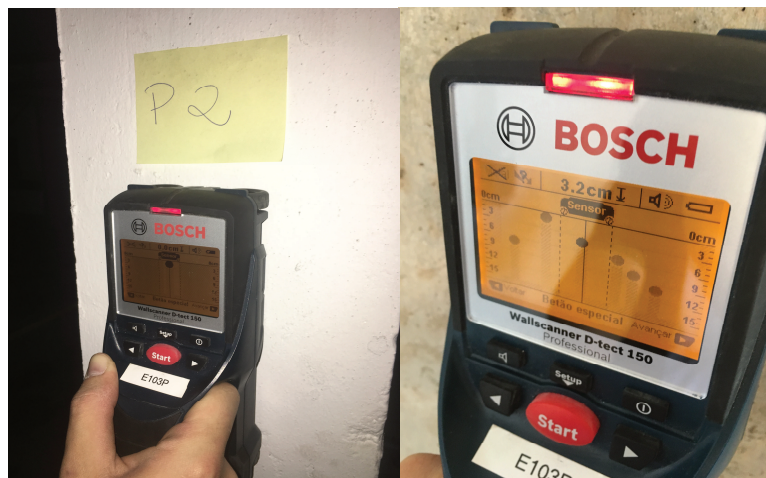
Para previsão da vida útil, a primeira etapa foi a identificação do coeficiente “ k ”. O tempo da estrutura de concreto foi obtido por meio das informações técnicas que cada gestor e construtora responsável forneceram. Para a obtenção da espessura carbonatada (ec), foi realizado um ensaio semi-destrutivo na edificação, com furadeira e detector de partículas eletromagnéticas (pacômetro) para obter a espessura do cobrimento das armaduras, paquímetro e sacos plásticos transparentes para coleta das amostras.

Conforme descrito, em cada um dos empreendimentos analisados haviam particularidades que nortearam os pilares escolhidos para análise. Assim, seguem descritas essas características: No Prédio 01 foram escolhidas amostras onde havia muro que protegia da intempérie o local de amostragem; outro local não protegido, (acima da altura do muro) e fachada (sem proteção). Nos Prédios 02 e 03 os locais foram escolhidos próximos à entrada (alta rotatividade de veículos) e subsolos, por conter menor ventilação e também alta rotatividade de veículos.

3.3.2 Verificação do cobrimento

Para a determinação da espessura de cobrimento foi utilizado detector de partículas eletromagnéticas (pacômetro), da marca Bosch, em todos os pilares escolhidos, conforme Figura 19. Além de determinar a espessura do cobrimento, o pacômetro auxiliou na locação das barras de aço, possibilitando que os furos não atingissem as barras.

Figura 19 - Detector de partículas eletromagnéticas para determinação de espessura

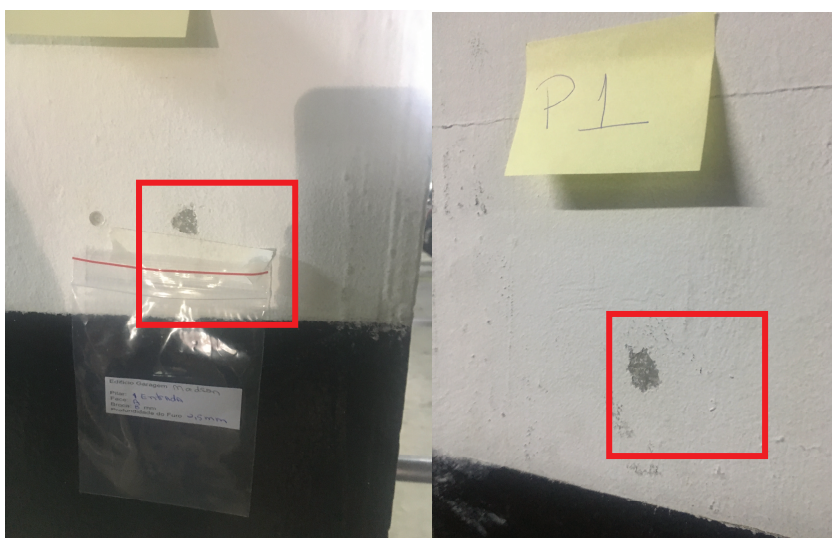


Fonte: A Autora.

3.3.3 Limpeza da superfície

Para a limpeza de superfície, inicialmente foi realizado lixamento para remoção da tinta na área de coleta e pincel para retirada de pó contaminante que pudesse influenciar a leitura após aplicação do reagente, ilustrado pela Figura 20. Destaca-se que em nenhum dos três prédios o concreto possui revestimento argamassado ou de outra natureza, tendo apenas nos prédios 2 e 3 o revestimento com tintas. A seguir, foi realizada fixação de sacos plásticos para coleta do pó.

Figura 20 - Remoção da pintura e limpeza



Fonte: A Autora.

3.3.4 Furação e coleta do pó

Para o processo de furação, foi utilizada furadeira com broca de 8 mm, ilustrada na Figura 21. Toda profundidade de furo foi aferida através de paquímetro, de acordo com a Figura 22. Cada elemento estrutural recebeu uma identificação utilizada na embalagem plástica do pó coletado (Figura 23), de modo que não houvesse equívocos em relação à análise dos dados.

Figura 21- Processo de furação com broca de 8mm e embalagem *ziplock* para coleta de amostra



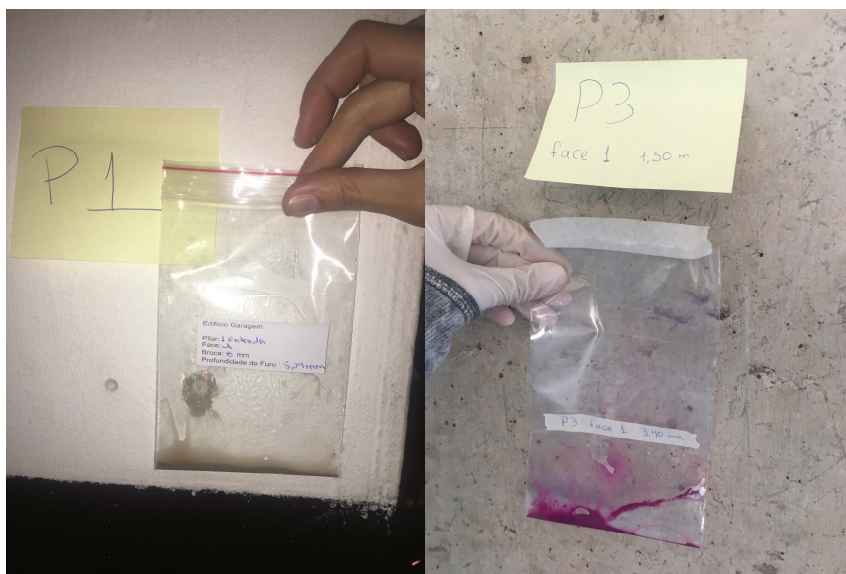
Fonte: A Autora.

Figura 22 - Paquímetro utilizado para determinação de profundidade



Fonte: A Autora

Figura 23 - Identificação de amostras



Fonte: A autora.

3.3.5 Aplicação de solução de fenolftaleína

Já feito o furo e recolhido o material, como indicador de pH foi aplicada uma solução à base de fenolftaleína, álcool etílico e água deionizada, na proporção respectiva de 1%, 49% e 50%, e o líquido foi aspergido no pó coletado. A solução de fenolftaleína indica material carbonatado através de colorimetria, lembrando que o material carbonatado não apresenta alteração de cor – Figura 24, permanecendo com a cor cinza característica das estruturas de concreto armado. A amostra não carbonatada apresenta uma coloração carmim. Destaca-se ainda que esse indicador apresenta tonalidades em função do potencial hidrogeniônico.

Figura 24- Aplicação de fenolftaleína para indicativo de carbonatação



Fonte: A Autora.

3.3.6 Verificação da Profundidade de Carbonatação

Para o ensaio de carbonatação nas três edificações, foi utilizado o mesmo método empregado por Craparo et al. (2015), o qual consistia em furação e colorimetria.

Os furos foram realizados com diferentes profundidades considerando um mesmo ponto de análise, de modo a realizar-se análise em progressão e identificar o ponto máximo de deterioração.

3.4 TRATAMENTO DOS DADOS

Para tratamento dos dados, considerou-se o número total de pontos, todavia vale ressaltar que no edifício 1, foi possibilitado um número maior de amostras e assim foram realizadas 6 furações a 1,5m e 1 furação com altura de 11,5m, uma vez que as amostras retiradas a uma altura menor contavam com a proteção de um muro, conforme já citado. Os parâmetros avaliados estão na Figura 25.

Figura 25 - Tabela de variáveis levantadas para tratamento de dados¹

Pilar	Altura de furo (m)	Espessura cobrimento (mm)	Profundidade de furo (mm)	Distância da fachada (m)	Status	Observação
Pilar 1				58,2		
Furo 01-LADO A	1,5	31	2,5			Não havia superfície agredida, frente nula, considerada como se fosse 5mm.
Furo 02-LADO A	1,5	31	5			
Furo 03-LADO B	11,5	31	3,52			Como a frente estava entre 3,52 e 6,5mm, utilizou-se 6,5mm indo a favor da segurança
Furo 04-LADO B	11,5	31	6,5			
Pilar 2				39		
Furo 01	1,5	32	3,33			Como a frente estava entre 3 e 5mm, utilizou-se 5mm indo a favor da segurança
Furo 02	1,5	32	5			
Pilar 3				29,4		
Furo 01	1,5	32	3,4			Na primeira profundidade já se verificou que não havia dano e esse foi o valor considerado
Pilar 4				Fachada		

Fonte: A Autora.

Como se percebe, para cada ponto de análise observou-se a altura do furo, cobrimento medido pelo detector de partículas, profundidade do furo, distância em relação à fachada, completando a tabela com a análise da presença ou não da carbonatação.

O intervalo entre um furo e outro foi na mesma projeção de aproximadamente 20 minutos, que é o período necessário para furar, coletar, identificar, aplicar o reagente e aguardar sua ação.

Em relação aos prédios 2 e 3, o número de pilares verificados e coleta de amostras foram menores, pois a visita para análise de campo foi supervisionada e não se teve liberdade de escolha de pilares (mais ou menos expostos às intempéries ou se apresentavam externamente algum indício de dano patológico) restando a escolha de locais e número de pontos a critério dos respectivos supervisores dos prédios 2 e 3.

¹ A Tabela inserida como Figura 25 tem função meramente ilustrativa, todavia possibilita a visualização das variáveis tratadas no levantamento de dados.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base no ensaio semi-destrutivo de carbonatação de estruturas de concreto, são apresentados os resultados obtidos *in loco* para os pilares analisados conforme as tabelas 9, 10 e 11. Juntamente, apresenta-se a previsão de vida útil de cada elemento calculado através do modelo de Tuutti e o gráfico de acordo com os resultados. Os resultados são apresentados de acordo com a edificação inspecionada.

4.1 PRÉDIO 1 – EDIFÍCIO ADMINISTRATIVO

Para a definição da idade do prédio 1 utilizou-se como base o tempo de execução da construção fornecido pelo gestor durante visitas e a informação do formulário constante no Apêndice II, que data o início da obra no ano de 1975 e término ao final de 1978, considerando que foram necessários 48 meses para execução da estrutura de concreto.

O edifício foi construído com bases nos parâmetros da Norma Alemã DIN 1045, pois, devido ao fato de ser um projeto inovador para a década, optaram pelo uso dessa norma. Consta nas informações técnicas que foi utilizado concreto com resistência à compressão característica aos 28 dias de 25MPa. Segundo as informações obtidas, não ocorreram problemas durante a execução da estrutura e não foram necessários reparos após a execução.

Através do formulário preliminar e do exame visual, constatou-se que a edificação foi por pilares, conforme apresentado no Capítulo 3.

A Tabela 09 apresenta amostras obtidas nos pilares do edifício administrativo – Prédio 01, sendo a profundidade em que foi percebida a presença de carbonatação é a indicação da frente de agentes agressivos do local. Esclarece-se também que o que está realçado em cor (magenta) refere-se às amostras não carbonatadas, conforme a cor obtida nas respectivas amostras de campo. O campo destacado como observação destaca a frente de carbonatação utilizada em cálculo.

Tabela 9 - Fatores técnicos e resultados de coleta de amostras – Prédio 01

Pilar	Altura de furo (m)	Espessura cobrimento (mm)	Profundidade de furo (mm)	Distância da fachada (m)	Status	Observação
Pilar 1				58,2		
Furo 01-LADO A	1,5	31	2,5			Não havia superfície agredida, frente nula, considerada como se fosse 5mm.
Furo 02-LADO A	1,5	31	5			
Furo 03-LADO B	11,5	31	3,52 ²			Como a frente estava entre 3,52 e 6,5mm, utilizou-se 6,5mm conservadoramente a favor da segurança
Furo 04-LADO B	11,5	31	6,5			
Pilar 2				39		
Furo 01	1,5	32	3,33			Como a frente estava entre 3 e 5mm, utilizou-se 5mm conservadoramente a favor da segurança
Furo 02	1,5	32	5			
Pilar 3				29,4		
Furo 01	1,5	32	3,4			Não havia superfície agredida, frente nula, considerada como se fosse 3,4mm para segurança
Pilar 4				Fachada		
Furo 01	1,5	42	2,6			Como a frente estava entre 22,34 e 29,34mm, utilizou-se 29,34mm conservadoramente a favor da segurança
Furo 02	1,5	42	3,46			
Furo 03	1,5	42	5,06			
Furo 04	1,5	42	7,34			
Furo 05	1,5	42	10,04			
Furo 06	1,5	42	15,85			
Furo 07	1,5	42	22,93			
Furo 08	1,5	42	29,34			
Pilar 5				19,8		
Furo 01	1,5	33	4,6			Como a frente estava entre 4,6 e 5,557mm, utilizou-se 5,57mm conservadoramente a favor da segurança
Furo 02	1,5	33	5,57			
Pilar 06				Fachada		
Furo 01	1,5	24	2,44			Como a frente estava entre 2,44 e 2,91mm, utilizou-se 2,91mm conservadoramente a

² Como foi utilizado equipamento de baixa precisão (furadeira) não foi possível adotar uma variação reduzida (1 a 2mm) em cada furo, e assim, em algumas medições o intervalo medido teve maior variação.

Furo 02	1,5	24	2,91		favor da segurança
---------	-----	----	------	--	--------------------

Fonte: A Autora.

Com as análises de profundidades quanto à carbonatação, os resultados foram submetidos ao modelo matemático de Tuutti (1982) trazido pela equação 04 em três etapas para previsão da vida útil de cada elemento. A Tabela 10 apresenta as variáveis relacionadas na equação e os resultados alcançados, no qual destacam-se os valores de vida útil residual, conforme mostram as etapas descritas e o memorial de cálculo presente no Apêndice I, representado na Figura 25.

Figura 26 - Demonstração do cálculo realizado- obtenção da vida útil residual

PRÉDIO 1

Pilar 1

1º Etapa- Verificação do valor da constante K

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 5,0 = k \cdot \sqrt{44} \quad k = \frac{5,0}{\sqrt{44}} \quad k = 0,75 \text{ mm / ano}$$

2º Etapa- Previsão da vida útil residual

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 31 = 0,75 \cdot \sqrt{t} \quad t = \left(\frac{31}{0,75}\right)^2 \quad t = 1691,36 \text{ Anos}$$

3º Etapa- Análise da vida útil calculada e residual

$$t = 1691,36 \text{ Anos} - t = 44 \text{ Anos} = t = 1647 \text{ Anos}$$

Vida útil idade da edificação vida útil residual

Fonte: A autora.

Tabela 10 – Tabela resumo das variáveis utilizadas na equação de Tuutti e os resultados obtidos

Variáveis	Un.	Pilar 1 h=1,5m	Pilar 1 h=11,5m	Pilar 2 h=1,5m	Pilar 3 h=1,5m	Pilar 4 h=1,5m	Pilar 5 h=1,5m	Pilar 6 h=1,5m
Idade da edificação	anos	44	44	44	44	44	44	44
ec – Espessura de Carbonatação	mm	5	6,5	5	3,4	29,34	5,57	2,91
ec – Espessura de Cobrimento	mm	31	31	32	32	42	33	24
k – Referência Obtida	mm/ano	0,75	0,98	0,75	0,51	4,42	0,84	0,44
Tempo de Vida Útil Projetada	anos	1691,36	1000,8	1802,24	3897,58	90,16	1544,44	2992,88
Tempo de Vida Residual	anos	1647	957	1758	3854	46	1500	2949

Fonte: A autora.

Com os dados obtidos foi gerado o gráfico 5 demonstrando a vida residual. O pilar 4 apresenta uma quantidade de anos de vida útil residual muito inferior em relação aos demais pilares, o que pode decorrer do seu posicionamento na fachada do prédio sem proteção dos agentes poluentes e intemperismo.

Gráfico 5: Vida residual dos pilares de amostragem do edifício Prédio 01.



Fonte: A Autora.

Em relação aos dados obtidos, cabe salientar que o comportamento da edificação se mostra satisfatório, com vida útil superior a 100 anos na maior parte dos locais de amostragem. Todavia ressalta-se que há uma grande disparidade de valores de vida útil entre o pilar 4 e os demais. Acredita-se que o fato do elemento de análise estar na fachada, isso o coloca de frente às variações climáticas e gases nocivos por conta do trânsito na rodovia BR 116, rodovia com alto movimento.

Nesse caso a NBR 15575 (ABNT, 2013) é muito posterior ao prédio, logo não é necessário atingir a VUP, apesar de ser um parâmetro interessante de ser avaliado em relação as premissas atuais de norma. Sendo a VUP de 50 anos, todavia a VUP residual é de 6 anos, pois o prédio já tem 44 anos.

Ao analisar-se o pilar com 11,5m de altura e os demais, percebe-se que com exceção do pilar 4, os demais apresentam maior vida útil residual, o que corrobora com a hipótese de que o muro de entorno possa ter favorecido na proteção da edificação. Medeiros Jr et al (2015), ao analisarem edifícios com 57 anos de idade,

também perceberam que houve maior agressividade em edificações em pontos mais altos, concordando com o obtido nesse estudo de caso.

Verificando os valores de cobrimento nominal da armadura obtidos nessa edificação é possível perceber que o menor valor é de 24mm, e assim, pode-se atribuir que houve a combinação citada por Helene (1983), de espessura adequada e qualidade do concreto, o que acabou por proteger os pilares da frente de dano. Destaca-se que trata-se de uma estimativa, uma vez que a qualidade do concreto não foi avaliada de fato.

Ainda, pode-se verificar que alguns dos resultados obtidos podem parecer irreais, uma vez que se chega a projetar uma vida útil residual de mais de 3000 anos, e isso ocorre, pois, os valores de K obtidos nesse estudo são muito pequenos, o que indica elevada qualidade do concreto. Meira, Paradatz e Borba Junior (2006) analisaram a carbonatação de estruturas de concreto, apontando para diferentes valores de K obtidos em seu estudo, variando conforme relação água/cimento (analisados os valores de 0,50; 0,57 e 0,65) e distância em relação a um ponto fixo (10, 100, 200 e 500m). Os resultados obtidos foram:

- Relação a/c de 0,50 com k máximo de 2,446 mm/ano^{1/2}, com distância de 500;
- Relação a/c de 0,57 com k máximo de 3,724 mm/ano^{1/2}, com distância de 500;
- Relação a/c de 0,65 com k máximo de 4,552 mm/ano^{1/2}, com distância de 500.

É possível perceber que os valores são muito superiores aos obtidos na análise do prédio 1, onde percebeu-se um k máximo de 4,42 mm/ano^{1/2} apenas no pilar 4, sendo os demais inferiores a 1 mm/ano^{1/2}.

4.2 PRÉDIO 2 – EDIFÍCIO GARAGEM

No prédio 2 – Edifício garagem - os dados para esse estudo foram fornecidos pela construtora e informado no formulário preliminar, que data a obra com início em 2000 e término no final de 2002. Averiguou-se que foi utilizado concreto utilizado concreto com resistência à compressão característica de 30MPa com 28 dias. Segundo as informações obtidas, não ocorreram problemas durante a execução da estrutura e não foram necessários reparos após a execução.

Constatou-se que a edificação foi executada em concreto armado com paredes de blocos de concreto, com dimensões de 14x19x39 cm, com revestimentos em ACM e vidros insulados na fachada. A Tabela 11 ilustra a medição da frente de carbonatação, mantida a mesma coloração da tabela anterior.

Tabela 11- Fatores técnicos e resultados de coleta de amostras – Prédio 02

Pilar 1	Altura de furo (m)	Espessura cobrimento (mm)	Profundidade de furo (mm)	Status	Observação
Furo 01 – LADO A	1,5	14	5,29		
Furo 02 – LADO A	1,5	14	8,08		
Furo 03 – LADO A	1,5	14	13,62		
Furo 04 – LADO A	1,5	14	14,97	Amostra descartada	Durante a retirada da amostra foi encontrado brita, portanto foi desconsiderada.
Pilar 1					
Furo 01 – LADO B	1,5	14	5,12		Como a frente estava entre 15,3 e 22,14mm, utilizou-se 22,14mm conservadoramente a favor da segurança.
Furo 02 – LADO B	1,5	14	12,22		
Furo 03 – LADO B	1,5	14	15,3		
Furo 04 – LADO B	1,5	14	22,14		
Pilar 2					
Furo 01	1,5	22	8,04		Como a frente estava entre 13,08 e 16,88mm, utilizou-se 16,88mm conservadoramente a favor da segurança.
Furo 02	1,5	22	13,08		
Furo 03	1,5	22	16,88		
Pilar 3					
Furo 01 – LADO A	1,5	15	5		Como a frente estava entre 12,31 e 17,64mm, utilizou-se 17,64mm conservadoramente a favor da segurança
Furo 02 – LADO A	1,5	15	9,05		
Furo 03 – LADO A	1,5	15	12,31		
Furo 04 – LADO A	1,5	15	17,64		
Pilar 3					
Furo 01 – LADO B	1,5	15	4,73		
Furo 02 – LADO B	1,5	15	10,92	Amostra descartada	Durante a retirada da amostra foi encontrado

	brita, portanto foi desconsiderada
--	------------------------------------

Fonte: A Autora.

De posse dos valores verificados na Tabela 11 conduziu-se a previsão de vida útil residual, cujos resultados são apresentados na Tabela 12 e gráfico 6, lembrando que os valores obtidos foram submetidos ao modelo de Tuutti, de acordo com o Apêndice I.

Ressalta-se que na Tabela 12, no cálculo de Vida Residual para os pilares 1 e 3, não foi aplicado o método de Tuuti por se tratar de estruturas já despassivadas e portanto, não aplicáveis ao método.

Tabela 12 – Tabela resumo das variáveis utilizadas na equação de Tuutti e os resultados obtidos

Variáveis	Unidade	Pilar 1 (lado B) h=1,5m	Pilar 2 h=1,5m	Pilar 3 (lado A) h=1,5m
Idade da edificação	anos	19	19	19
ec – Espessura de Carbonatação	mm	22,14	16,88	17,64
ec – Espessura de Cobrimento	mm	14	22	15
k – Referência Obtida	mm/ano	5,08	3,87	4,05
Tempo de Vida Útil Projetada	anos	7,6	32,27	13,74
Tempo de Vida Residual	anos	Não se aplica³	13	Não se aplica⁴

Fonte: A autora.

³ Não se aplica o método de Tuuti em estruturas despassivadas.

⁴ Idem.

Gráfico 6 - Vida residual dos pilares de amostragem do edifício Prédio 02.



Fonte: A Autora.

O local de retirada de amostras, ou seja, a garagem do edifício, apresenta alta concentração de CO₂, por se tratar de um ambiente com pequena circulação de ar. Todavia, ressalta-se que os elementos analisados dizem respeito apenas à garagem. Outro fator preponderante foi o cobrimento abaixo do especificado em norma, que prevê cobrimento nominal de 30mm, com tolerância de execução de 10mm. Ou seja, as camadas de concreto deveriam ser de 20mm em qualquer ponto dos pilares e vigas, porém não foi o observado, à exceção do Pilar 2, único que ainda consegue ter as armaduras protegidas.

Lembra-se que elementos estruturais são considerados não manuteníveis, por isso a importância da qualidade das estruturas (ABNT NBR 15575:2013).

Ao analisar-se ponto a ponto o avanço da frente de carbonatação e os valores de cobrimento preconizados em norma, têm-se uma combinação de agressão intensa e pequena proteção as barras de aço. Nesse prédio, o pilar 2 apresenta vida útil residual de apenas 13 anos, porém, se fosse seguido o cobrimento preconizado em norma de 30mm, em oposição ao obtido de 22mm, teria-se uma vida útil residual de 41 anos, porém a norma também nos permite uma tolerância de 10mm. Ou seja, buscamos 20mm. O cobrimento do pilar 2 atendeu o especificado. Se houvesse

cobrimento de 30mm no pilar 1, a vida útil residual seria de 16 anos e o pilar 3 apresentaria vida útil residual de 36 anos. Assim, cabe citar que não há apenas um dano intenso, mas uma inconformidade de projeto e/ou execução que está minorando a durabilidade da edificação.

Destaca-se ainda, que a Lei de Tutti não pode ser considerada nos elementos Pilares 1 e 3, uma vez que as armaduras já se encontravam despassivadas e portanto, não passíveis de aplicação do método.

O Prédio 2 tem seu elemento Pilar 2 como o que mais se aproxima desse valor, porém, apresenta-se abaixo do esperado, uma vez que a espessura de carbonatação está em um estado avançado referente ao cobrimento da armadura, que é de 22 mm. Já os demais pilares avaliados dessa edificação apresentaram valores negativos quando submetidos ao modelo de Tuuti (1982), indicando nesses casos que a armadura estaria despassivada e a vida útil encerrada, conforme modelo de deterioração proposto por Helene (1997).

4.2 PRÉDIO 3 – EDIFÍCIO GARAGEM

No prédio 3, analisado em seu ambiente de garagem, os dados para esse estudo foram fornecidos pela construtora e informado no formulário preliminar, que data o início do início de novembro de 2012 e término no final de abril de 2015. Foram necessários 30 meses para execução da estrutura de concreto.

Averiguou-se que foi utilizado concreto com resistência à compressão característica de 30MPa aos 28 dias. Segundo as informações obtidas, o solo do terreno era muito rochoso e fez com que demorasse mais meses para a fundação. Já na execução da estrutura não houve problemas e não foram necessários reparos após a execução.

Constatou-se que a edificação foi executada em concreto armado com paredes de blocos de concreto, com dimensões de 14x19x39 cm com revestimentos em ACM e vidros insulados na fachada. Os resultados das amostras obtidas no edifício Prédio 03 estão descritas na Tabela 13.

Tabela 13 - Fatores técnicos e resultados de coleta de amostras – Prédio 3

Pilar 1	Altura de furo (mm)	Espessura cobrimento (mm)	Profundidade de furo (mm)	Status	Observações
Furo 01 – LADO A	1,5	25	3,23		
Furo 02 – LADO A	1,5	25	4,98		
Furo 03 – LADO A	1,5	25	9,61		
Furo 04 – LADO A	1,5	25	11,18		
Furo 05 – LADO A	1,5	25	14,42		Como a frente estava entre 14,42 e 17,11mm, utilizou-se 17,11mm indo a favor da segurança
Furo 06 – LADO A	1,5	25	17,11		
Pilar 1					
Furo 01 – LADO B	1,5	0	4,58		
Furo 02 – LADO B	1,5	0	10,92		
Furo 03 – LADO B	1,5	0	12,99	Amostra Descartada	Durante a retirada da amostra foi encontrado brita, portanto foi desconsiderada
Pilar 2					
Furo 01 – LADO A	1,5	15	5,34		
Furo 02 – LADO A	1,5	15	14,31		Como a frente estava entre 14,31 e 15,45mm, utilizou-se 15,45mm indo a favor da segurança
Furo 03 – LADO A	1,5	15	15,45		
Pilar 3					
Furo 01	1,5	31	5,95		
Furo 02	1,5	31	7,85		Como a frente estava entre 7,85 e 11,55mm, utilizou-se 11,55mm indo a favor da segurança
Furo 03	1,5	31	11,55		

Fonte: A Autora.

Analisando-se os valores obtidos de cobrimento real da armadura, pode-se atribuir grande variabilidade na execução da edificação, com intervalos de cobrimento que variam entre 15 e 31mm. Silva e Jonov (2011) afirmam que existe grande interferência da mão de obra na execução das estruturas, o que impacta na

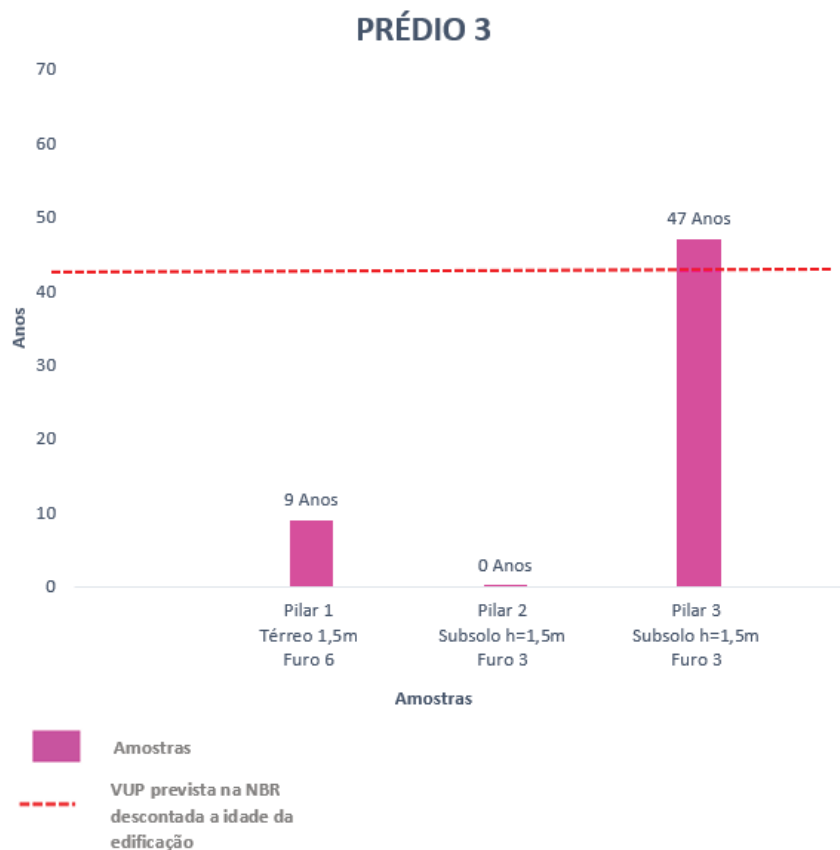
garantia do cobrimento mínimo, e isso se faz presente nos resultados obtidos, (Tabela 14 e o Gráfico 7), estando os cálculos presentes no Apêndice I.

Tabela 14 – Tabela resumo das variáveis utilizadas na equação de Tuutti e os resultados obtidos

Variáveis	Unidade	Pilar 1 (lado A) h=1,5m	Pilar 2 (lado A) h=1,5m	Pilar 3 h=1,5m
idade da edificação	anos	7,5	7,5	7,5
ec – Espessura de Carbonatação	mm	17,11	15,45	11,55
ec – Espessura de Cobrimento	mm	25	15	31
k – Referência Obtida	mm/ano	6,25	5,64	4,22
Tempo de Vida Útil Projetada	anos	16,01	7,07	54,03
Tempo de Vida Residual	anos	9	0	47

Fonte: A autora

Gráfico 7: Vida residual dos pilares de amostragem do edifício Prédio 03.



Fonte: A Autora.

Com base nos resultados apresentados nas tabelas e gráficos, apenas o Pilar 3 apresentou uma vida útil projetada aos 50 anos, conforme recomendado pela NBR 15575 (ABNT, 2013). No pilar 01, foi seguido a norma, pois para áreas urbanas é solicitado 30mm com uma tolerância de 10mm de acordo com ABNT NBR 6118, porém nos apresentou uma vida útil residual abaixo do mínimo.

Ao analisar o avanço da frente de carbonatação e os valores de cobrimento prescritos em norma, tem-se uma combinação de agressividade intensa e pequena proteção as barras de aço. Nesse prédio, o pilar 2 não apresenta vida útil residual, porém, se fosse seguido o cobrimento preconizado em norma de 30mm, em oposição ao obtido de 15mm, ter-se-ia um de vida útil residual de 21 anos. Vale lembrar que os pilares 1 e 2 estavam no subsolo, sem boa ventilação e o pilar 3 estava em ambiente ventilado.

Assim, cabe citar que não há apenas um dano intenso, mas uma não conformidade projeto e/ou execução que está minorando a vida útil da edificação. Silva e Jonov (2011) já apontavam para grande participação das falhas de execução nos danos encontrados na edificação, o que vai ao encontro do obtido nesse estudo.

Helene (1993) relata que quanto à durabilidade, diversos fatores são responsáveis pela garantia da vida útil de projeto, e entre eles, destaca-se o cobrimento da armadura, que é a espessura de concreto entre a barra de aço e a camada externa do elemento. Sua função é proteger o aço contra agentes ambientais agressivos e contra possíveis choques físicos. A inobservância ou descaso com esse parâmetro construtivo resultam em diversas obras de recuperação estrutural, quase sempre de alto custo, e frequentemente associadas à corrosão da armadura. A qualidade e eficiência dessa camada de proteção estão relacionadas com a garantia da espessura mínima e com a qualidade do concreto.

5 DISCUSSÃO

5.1 AGRESSIVIDADE DO MEIO URBANO

Lima e Morelli (2005) esclarecem a caracterização da agressividade do ambiente urbano através de suas características de concentração populacional, uma vez que trazem consigo alterações do meio original. Essas alterações, quando se estuda a degradação das construções, em especial das estruturas de concreto, incluem a ocorrência de chuvas ácidas, deposição de partículas sólidas e lançamento de dióxido de carbono na atmosfera, responsável pela carbonatação dos concretos e corrosão das armaduras. Além desses aspectos, cabe salientar que o meio urbano provoca alterações no regime de ventos, pela criação de corredores de vento, onde se tem alteração nas características de chuva dirigida, em especial nos centros, mais densos, além da alteração da distribuição de temperaturas.

Tais características puderam ser percebidas nesse trabalho, ao serem analisados os resultados obtidos nos edifícios utilizados como garagem (prédios 2 e 3) e no edifício localizado próximo à rodovia de alto fluxo (prédio 1). No prédio 1, a configuração arquitetônica favorece a circulação de ar, minimizando a concentração de gases como o dióxido de carbono, podendo reduzir sua concentração (PAULETTI, 2004).

Também analisando comparativamente os ambientes, pode-se supor que dava a envoltória verificada in loco, que nas edificações utilizadas como garagem há o acúmulo de água, sendo a umidade de relevância direta na possibilidade de ocorrência da carbonatação (WERLE, 2010).

A região urbana de Porto Alegre apresenta uma grande variação na concentração e dispersão dos poluentes atmosféricos. Estas alterações, muitas vezes estão associadas às mudanças do clima, variam ao longo das estações do ano. Segundo informações do programa de monitoramento do ar realizado pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental - FEPAM, em diferentes áreas da cidade, a frota veicular é um dos principais contribuintes, tornando o ar limítrofe para as definições da resolução 003/30 do CONAMA (MARIO, 2012). Conforme descrito, a deterioração de uma estrutura pode estar relacionada a diferentes agentes. No caso da carbonatação, o seu estabelecimento é notadamente atribuído à ação de dióxido de carbono. Nos ambientes do estudo, principalmente Prédio 2 e Prédio 3, o

concreto estava exposto à alta concentração de gases, por se tratarem de garagens. Esse dióxido de carbono penetra nos poros do concreto, dilui-se na umidade presente na estrutura e forma o ácido carbônico (H_2CO_3).

Vaghetti (2005) esclarece que, a depender do microclima da região onde se encontra a estrutura, o avanço da frente carbonatada pode ser maior ou menor, sobretudo pela influência do teor ou concentração de gás carbônico e da umidade relativa do ambiente, bem como do teor de umidade interna do concreto.

Em relação às amostras do Prédio 1, das dezenove amostras, onze apresentaram área carbonatada e as profundidades maiores se deram em locais com exposição às intempéries. Ressalta-se que em relação aos resultados obtidos de áreas carbonatadas, no prédio 1 os pilares 1, 2, 3 e 6 são protegidos por um muro, o pilar 4 não tem proteção alguma e o pilar 5, embora desprotegido, não apresentou sinais de frente de carbonatação. Salienta-se que há bastante circulação de ar. Nesse ambiente, percebe-se que, muito embora relatada uma resistência de 25MPa, parece ter sido utilizado concreto de maior resistência à compressão, o que de fato, apresentaria relação direta com a frente de carbonatação, como já demonstrado por Pacheco (2016).

Esclarece-se que no prédio 2, um elemento (pilar) é na entrada da garagem, contando com circulação de ar, sendo os demais, em subsolo. Em relação ao prédio 3, apenas o pilar 3 fica próximo a entrada os demais pilares analisados são em pavimentos intermediários.

No prédio 03, a vida útil residual se mostrou abaixo do normalizado nos pilares 01 e 02 respectivamente. Tal fato pode decorrer da elevada variação percebida no valor dos cobrimentos nominais da armadura, além de seus valores serem inferiores ao que recomenda a norma técnica de dimensionamento de concretos, conforme será apresentado no próximo item. Assim, nessa edificação verificou-se uma combinação de falha na execução e/ou projeto, somada a agressividade intensa no local.

Considerando o fator umidade, afirma-se que quando os poros do concreto se encontram excessivamente secos, a penetração de CO_2 acontece facilmente, mas faltará água para que ocorra a carbonatação; enquanto que em poros saturados essa reação não ocorre facilmente por conta da dificuldade de difusão do gás. Já em ambientes com umidade relativa entre 50 e 80%, as condições são mais favoráveis e a velocidade de avanço da frente carbonatada é alta, favorecendo a deterioração.

Desta forma, para que ocorra a carbonatação, basta certa concentração de CO_2 e uma certa umidade relativa do ar para que se configure um processo natural de deterioração de estruturas (VAGHETTI, 2005).

Neville (1997) relata que em zonas pouco povoadas, a concentração de CO_2 está ao redor de 0,03% em volume e em ambientes mais agressivos, como grandes centros urbanos e interior de túneis de veículos, essa concentração pode variar entre 0,3% e 1% em volume. Já dados climáticos de 2017, verificam o recorde de 410 ppm (partes por milhão), o que configura em volume, 0,041% de CO_2 na atmosfera (NOAA, 2017). Analisando-se as edificações abordadas nesse estudo, pode-se comparar os edifícios garagens com o interior de túneis, uma vez que há pequena circulação de ar. Como já citado, mesmo o prédio 1 sendo o mais antigo, e estando muito próximo à uma rodovia de alto impacto, pode-se atribuir uma qualidade superior ao concreto, somada a características arquitetônicas que favoreceram a circulação de ar, e consequente redução da concentração de CO_2 .

Carmona (2005), através de um estudo que verificou a despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação, constatou que a fissuração e umidade têm influência direta na profundidade da carbonatação. Em relação à umidade, foi concluído que a profundidade de carbonatação foi menor em áreas de infiltração, contudo nestas áreas foi observada a existência de corrosão de armaduras. O autor concluiu, então, que na respectiva obra utilizada como objeto de estudo, o baixo controle de qualidade foi fundamental para a variabilidade elevada de profundidade de carbonatação, que se encontrou bem superior aos valores bibliográficos.

Os valores obtidos pelo autor concordam com o que foi verificado nesse estudo, uma vez que nos prédios 2 e 3, seja pela concentração ou pela presença intensa de umidade, verificou-se valores muito superiores em relação ao que era esperado, inclusive, com pontos em que a armadura encontrava-se despassivada e com projeção reduzida de vida útil residual.

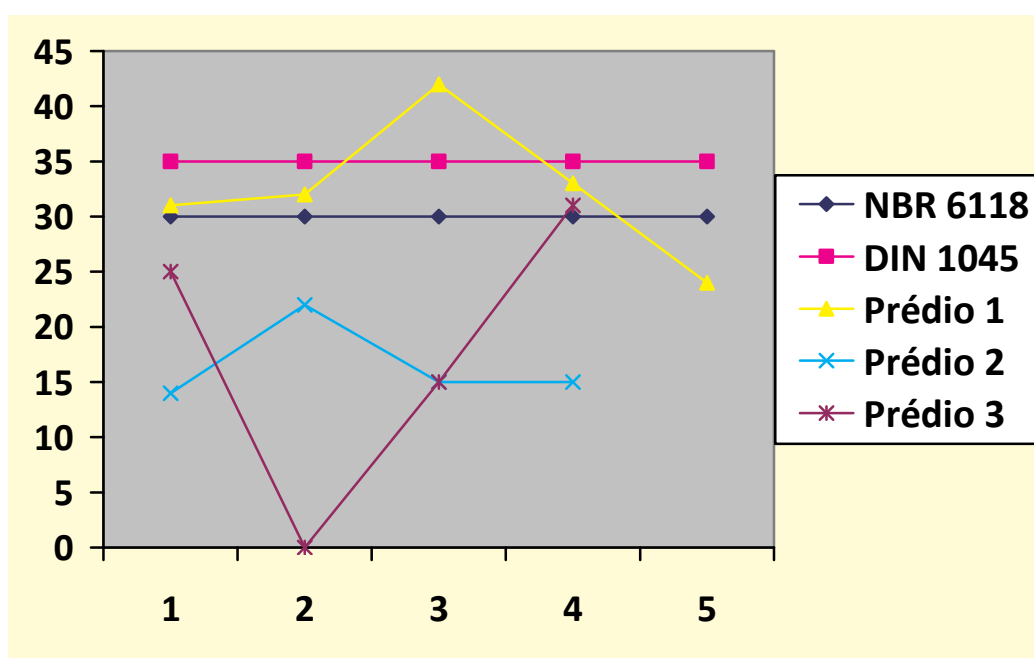
Cascudo (1997) salienta que a armadura inserida no interior do concreto encontra-se em um estado passivo em detrimento à corrosão, devido a uma fina camada de óxido formada pelo meio altamente alcalino, propiciado pela solução dos poros do concreto. Em síntese, o fenômeno consiste em um processo físico-químico entre o gás carbônico (CO_2) presente no ar e os produtos da hidratação do cimento, transformando íons alcalinos em carbonatos. Em relação à isso, no prédio 02,

observando-se o gráfico 06, percebe-se que os pilares 01 e 03 apresentaram valores negativos para vida útil ou seja, indicam a despassivação da armadura no local de amostragem, que deve ser recuperada, embora a edificação tenha apenas 19 anos.

5.2 ANÁLISE DO COBRIMENTO OBTIDO E CONFORMIDADE COM RESPECTIVAS NORMAS TÉCNICAS

Em relação aos cobrimentos encontrados nos pilares analisados nos Prédios 1, 2 e 3 estes ficaram entre 0mm e 42mm (já explanado nas Tabelas 09, 10 e 11). O gráfico 8 mostra os cobrimentos encontrados e os relaciona com o que é preconizado na NBR 6118 (ABNT, 2014) e na DIN 1045, considerando o ambiente em que as edificações estão inseridas.

Gráfico 8 - Valores de cobrimento referenciados em norma x cobrimento encontrado



** Prédios 2 e 3 foram analisados menos pilares e consequentemente, menos amostras.

Fonte: A autora.

Analisando ponto a ponto a edificação e as exigências das normas, percebe-se que em relação ao prédio 1, apenas um ponto encontrou-se abaixo das exigências da norma nacional, e apenas um ponto satisfaz as exigências trazidas pela norma alemã. Em relação ao prédio 2, verifica-se um cenário pior, uma vez que

não há atendimento nem a norma nacional, o que culminou no estado de dano verificado na edificação. Para o prédio 3 verificou-se uma maior variabilidade nos valores de cobrimento obtidos, denotando para um cenário com maior variabilidade no processo e consequente menor confiabilidade.

A corrosão ocorre quando as armaduras foram despassivadas, ou seja, perderam a proteção proporcionada pelo concreto. Nesse cenário, percebe-se a importância da camada de cobrimento do concreto, que por sua espessura e qualidade de composição, garante a proteção (ABNT NBR 6118:2014). Uma vez que a estrutura encontra-se despassivada, há perda da garantia de seu funcionamento no estado de serviço, assim como no Pilar 1 e 3 do Prédio 2.

Freire (2005), Helene (1993) e Carmona (2013) relatam que a espessura do cobrimento da armadura contribui para o controle da movimentação de agentes de agressão no interior da estrutura, de forma que, quanto maior a espessura do cobrimento, maior o intervalo de tempo para que o dano seja elevado. Assim, a qualidade do concreto, a baixa penetrabilidade e a espessura do concreto agem em conjunto protegendo a estrutura.

Assim sendo, levando em consideração as classes de agressividade, o cobrimento ideal e os riscos estruturais assumidos, quando não há camada de cobrimento, fica evidente que as estruturas tendem a apresentar mais problemas ou manifestação patológicas que poderiam e deveriam ser evitáveis, pois tratou-se de pilares, e como já mencionado, são estruturas consideradas não manuteníveis.

Cabe destacar nesse ponto, que não apenas a norma brasileira e a norma alemã apresentam valores mínimos de cobrimento nominal nessa ordem de grandeza, mas sim, que percebe-se uma semelhança também com outras normas internacionais como a australiana AS 3600 e a indiana IS456 (PACHECO, 2016).

6 CONCLUSÃO

Buscou-se nesse estudo avaliar a frente de carbonatação em três diferentes edificações, avaliando ainda sua vida útil residual e conformidade com os valores de cobrimento de concreto estipulados em norma. Salienta-se que os valores obtidos são pontuais para cada elemento avaliado, podendo haver outros resultados em diferentes pontos inclusive na mesma edificação, o que pode ser confirmado na variabilidade de cobrimentos nominais de armadura encontrados em um mesmo prédio. Observa-se também que a variação dos resultados é elevada, impossibilitando a previsão de tempo de vida útil da edificação como um todo. Atesta-se assim que os dados não podem ser extrapolados para o conjunto de elementos, tampouco para outras edificações de características semelhantes.

Por outro lado, a análise pontual, se realizada na totalidade da edificação, pode embasar a hierarquia de intervenções da edificação, uma vez que, identifica-se no cálculo da vida útil residual quais os pontos mais críticos e que podem apresentar um risco em termos de estabilidade estrutural, uso e segurança dos usuários das edificações.

Analisando-se comparativamente os resultados obtidos, percebeu-se que, no Prédio 1, mesmo sendo a edificação com maior idade de uso, que dadas as características elevadas de resistência mecânica do concreto e o maior controle do cobrimento nominal, há vida útil residual estimada superior aos demais. Cabe destacar também a localização do imóvel, que tem fachada orientada para rodovia de alto fluxo, e por consequência, na qual estima-se elevada concentração de dióxido de carbono. Sobre essa edificação, vale ainda destacar que os valores obtidos devem ser analisados criticamente, uma vez que em termos matemáticos chegaram a apontar vida útil residual de mais de 1000 anos, o que indica para uma expectativa surreal.

Os prédios 2 e 3, muito embora apresentem menor idade de uso, apresentaram a maior variabilidade nos cobrimentos nominais da armadura – em alguns pontos inferiores ao referenciado em normas técnicas- e por consequência, as maiores frentes de dano, chegando a apontar para indicativo de armadura despassivada

Pode-se observar que o cobrimento estava abaixo do especificado em norma. Nas estruturas de concreto, o cobrimento adequado tem como função principal

garantir proteção física e química para as estruturas. Falhas nessa barreira significam sujeitar os componentes às agressividades do meio ambiente, que induzem à corrosão do material e comprometem a capacidade de suporte de carga de toda a estrutura. Desta forma, quando a proteção é insuficiente em relação à agressividade de um ambiente, as manifestações patológicas surgem em poucos anos e agravam-se ao longo dos anos. Para maiores esclarecimentos, um estudo a respeito da repassivação das armaduras ou inibidores seria interessante, tendo em conta os valores nulos obtidos no prédio 2.

Verificou-se nesse estudo que as características de configuração arquitetônica da edificação, concentração de dióxido de carbono, presença de umidade e conformidade construtiva exercem influência sobre a deterioração.

6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- a) Analisar experimentalmente a variação da profundidade de carbonatação mensurada através do ensaio colorimétrico com extração de testemunho e com coleta do pó;
- b) Ensaiar o concreto do testemunho do Prédio 1 de forma a analisar os aditivos utilizados em 1978.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, A.T. de; PINHEIRO, L.M. **Viabilidade Econômica de Alternativas Estruturais de Concreto Armado para Edifícios**. In: Cadernos de Engenharia de Estrutura. Estruturas de Concreto, n. 19. Universidade de São Paulo, 2002. Disponível em: http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova_versao/pdf/cee19.pdf Acesso em: 09 fev 2018v

ABRAMS, M. S. **Compressive Strength of concrete at temperature to 16000 F**. American Concrete Institute SP 25 Temperature and Concrete. Detroit, Michigan, 1971.

ALMEIDA, F.C.R; SALES, A. **Efeitos da ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto**. In: RIBEIRO, D.V. (Org.). Corrosão em Estruturas de Concreto. Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

AMORIM, A. A. **Durabilidade das Estruturas de Concreto Aparente**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: Análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 1997.

ANDRADE, J.J.O. et al. **Avaliação das características do concreto quando submetido à degradação de origem química**. In: Congresso Brasileiro do Concreto– REIBRAC, 45, 2003, Vitória - ES. Anais. São Paulo: IBRACON, 2003.

ANDRADE, T.; SILVA, A. J. C. **Patologia das Estruturas**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

ARAÚJO, F.W.C. de. **Estudo da repassivação da armadura em concreto carbonatado através da técnica de realcalinização química**. Tese (doutorado). 2015. São Paulo – USP.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14931: **Execução de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 15575: **Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 6118: **projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2014

_____. NBR 12.655: **Concreto de Cimento Portland**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR 8681: **Ações e Segurança nas estruturas**. Rio de Janeiro, 2003.

AUSTRALIAN STANDARD. AS 3600. **Concrete Structures**. Sydney: Standards Australia Limited, 2009.

BONIC, Z. Et al. **Damage of Concrete and Reinforcement of Reinforced-Concrete Foundations Caused by Environmental Effects**. In: International Scientific Conference Urban Civil Engineering and Municipal Facilities, SPbUCEMF-2015. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581501841X> Acesso em 18 mar 2019.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. IS 456. **Plain and Reforced Concrete – Code of Practice**. New Delhi: Bureau of Indian Standards, 2000.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1ª ed. Goiânia: Editora UFG, 1997.

CALLISTER Jr., W.D., **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma Introdução**. 7ª Edição, Ed. Guanabara, 2008.

CANOVAS. M. F. **Hormigon**. Ed.: Colégio de Ingenieros de Caminos. 1988.

CAPRARO, A.P.B. Et al. **Ensaio básicos para inspeções rotineiras em pontes de concreto**. In: 18º ENACOR – Encontro nacional de conservação rodoviária. 2015. Disponível em: http://www.sinicesp.com.br/44rapv/trabalhos/TrabalhoFinal_192.pdf Acesso em 18 fev. 2018.

CARMONA, T. **O que é Fissuração nas Estruturas de Concreto?** Boletim Técnico nº 3 – Asociación Latino-americana de Control de Calidad, Patología e Recuperación de la Construcción – ALCONPAT Int. 2013.

CARMONA, T.G. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação**. Dissertação (Mestrado). 2005. São Paulo – USP.

CARVALHO, L. D. **Levantamento e identificação de manifestações patológicas em fachadas de edifícios antigos da Baixa Portuense**. Portugal: Instituto. 2013.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Ações da carbonatação no concreto**. In: ISAIA, G. C. (Cord.) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1a. Ed. São Paulo. IBRACON, v 1, 2011.

CELADIN, W. **Innovative Structural Systems and Durability**. In: International Scientific Workshops “Innovative Structural Systems in Architecture”. 2016, Poland.

COSTA, C. N. Et al **O fenômeno do lascamento (spalling) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica**. In: Congresso Brasileiro do Concreto– REIBRAC, 44, 2002, Belo Horizonte - MG. Anais. São Paulo: IBRACON, 2002 (CD Rom).

DIN 1045 - **Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausfuehrung**, 2001.

Disponível em: https://umwelt-online.de/recht/bau/din/1045_1ges.htm Acesso em 14 nov 2018.

FIGUEIREDO, E.P. **Durabilidade de estruturas de concreto está sujeita à ação do meio ambiente**. AECWeb. 2014. Disponível em: <

https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/durabilidade-de-estruturas-de-concreto-esta-sujeita-a-acao-do-meio-ambiente_12727_0_1 Acesso em 18 mar 2018.

FRACALOSSI, I. **Clássicos da arquitetura: centro de mecanização do banco do brasil / irmãos Roberto**. ArchDaily. 2013. Disponível em:

<https://www.archdaily.com.br/br/01-156395/classicos-da-arquitetura-centro-de-mecanizacao-do-banco-do-brasil-slash-irmaos-roberto> acesso em 05 mai 2018.

FREIRE, K. R. R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

GASPAR, D. T. **Durabilidad del hormigón; corrosión química ; algunas consideraciones**. CEMCO 88. Madrid, Instituto Eduardo Torroja, Seminario S. 1, 1988.

GRUBE, H.; KERKHOFF, B. **The new German concrete standards DIN EN 206-1 and DIN EN 1045-2 as basis for the design of durable constructions**. 2016.

Dusseldorf, GER. Disponível em: < https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Betontechnische_Berichte/019-028_Betonnormen.pdf> Acesso em 13 out 2018.

HELENE, P.; MEDEIROS, M.H.F.; GOBBI, A. Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos. : **R. Esc. Minas**. Ouro Preto, 2013. Disponível em:

<<http://www.scielo.br/pdf/rem/v66n1/a08v66n1.pdf>> Acesso em: 05 mar 2018.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993, 231f. Tese (Livre Docência) – Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. **Vida Útil das Estruturas de Concreto**. In: Congresso Ibero Americano de Patologia das Construções, 1997, Porto Alegre: CON PAT-97., v. 1.

HELENE, P. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Editora Pini – Instituto de pesquisas Tecnológicas IPT, 1986.

HELENE, P. La Agressividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón. **Revista Hormigón**, Barcelona, n. 10, 1983. Disponível em : <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2016/09/HelenePauloR%20L1983.pdf> Acesso em 02 jul 2018.

ISLAM, M.M.; ISLAM, M.S. Strength and Durability Characteristics of Concrete made with Fly-Ash Blended Cement. **Australian Journal of Structural Engineering**.

2013. Disponível em: <https://doi.org/10.7158/13287982.2013.11465140> Acesso em 15 mar 2019.

LIBÓRIO, J.B.L. **Patologia das Construções**. EEC – USP. Notas de Aula. 1998

LIMA, M.G., MORELLI, F. **Mapa Brasileiro de Chuva Dirigida – Algumas considerações**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VI, 23-25, Florianópolis. Anais. ANTAC, Florianópolis, 2005.

LI, V.C.; HERBERT, E. Robust Self Healing Concrete for sustainable Infrastructure. **Journal of advanced Concrete technology**, vol. 10, 2012. Disponível em <https://pdfs.semanticscholar.org/bd0a/1e7d667c1298d5f5908775e1aba5debfe24b.pdf> Acesso em jan 2019.

MARIO, M. P. J. **Poluição atmosférica como condicionante no processo de ocupação do espaço urbano: Análise na cidade de Porto Alegre, RS**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano e Industrial) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

MEDEIROS, M.H.F.; ANDRADE, J.J.O.; HELENE, P. Durabilidade e Vida útil das Estruturas de Concreto. ed. Concreto: Ciência e Tecnologia. 2011.1ª ed. São Paulo, IBRACON, Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc55.pdf> Acesso em 05 ago 2018.

MEDEIROS, M.H.F., HELENE, P.. **Estimativa da Elevação da Vida Útil do Concreto Armado através do Coeficiente de Difusão de Cloretos**. São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Boletim Técnico BT/PCC/504, 2011.

MEDEIROS, M.H.F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. Tese de Doutorado. São Paulo: Universidade de São Paulo, Brasil, 2008. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-20072009-174802/en.php> Acesso em 01 abr 2018.

MEDEIROS-JUNIOR, R.A.; LIMA, M.G.; YAZIGI, R.; MEDEIROS, M.H.F. Carbonation depth in 57 years old concrete structures. **Steel and Composite Structures**, Vol. 19, nº 04, 2015.

MEIRA, G.R.; PADARATZ, I.J.; BORBA JUNIOR, J.C. **Carbonatação natural de concretos: resultados de cerca de quatro anos de monitoramento**. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. Florianópolis/SC, 2006.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2.ed., 2014.

METHA, P. K. **Durability of concrete – Fifty years of progress?**. In: Colóquio internacional – avanços na tecnologia de produção e reparo de concretos em meios agressivos. 1992. USP - São Paulo.

MONTEIRO, E.C.B.; PEREIRA, V.C.O. Avaliação da capacidade de proteção de adições minerais em relação à corrosão de armaduras devido à carbonatação. **Construindo**, Belo Horizonte, v.3. nº1, 2011.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5 ed. Ed.: Bookman. 2016.

NEVILLE, A. M. **Tecnologias do Concreto**. 2 ed. Ed.: Bookman. 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Trad. Giammusso, E.D. São Paulo: Pini, 1997.

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration. **Climate Prediction Center Brazil**. 2017. Disponível em:
https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/JAWF_Monitoring/Brazil/index.shtml
 Acesso em 12 jan 2019.

PACHECO, F. **Investigação da relação entre os parâmetros de projeto das estruturas de concreto armado visando à durabilidade**. Dissertação de mestrado. São Leopoldo – UNISINOS. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2016.

PACHECO, J.; HELENE, P. Controle da Resistência do Concreto. **Revista Concreto e Construções**. 2013. Disponível em:
<https://drive.google.com/file/d/10YopH4yL0uPG8cs19HsM2xAzL0coMs-0/view>
 Acesso em: 11 fev. 2018.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2004.

PRADO, J.F.M de A.; CORRÊA, M.R.S. **Estruturas em Edifícios de Concreto Armado Submetidas à Ação de Construção**. In: Cadernos de Engenharia de Estrutura. Estruturas de Concreto, n. 19. Universidade de São Paulo, 2002. Disponível em: http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova_versao/pdf/cee19.pdf
 Acesso em: 08 fev. 2018

PEREIRA, L.H.; VIEIRA, T.S. **Construction and Demolition Waste recycling: The Case of the Portuguese Northern Region**, Diss. Mestrado, Minho Univ., Portugal 2013.

PINHEIRO, L.M. Et al. **Características do Concreto**. Departamento de Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo. 2010. Disponível em:
<http://www.set.eesc.usp.br/mdidatico/concreto/Textos/02%20Concreto.pdf> Acesso em 10 fev. 2018

PINHEIRO, L.M.; MUZARDO, C.D.; SANTOS, S.P. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. Escola de engenharia de São Carlos. USP, 2003.

POSSAN, E.; ANDRADE, J. J. O. Markov Chains and reliability analysis for reinforced concrete structure. service life. **Materials Research**, v. 17, n. 3, 2014.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/274840810_Markov_Chains_and_Reliability_Analysis_for_Reinforced_Concrete_Structure_Service_Life> Acesso em 05 set 2018.

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

RIBEIRO, D. V. **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

SAETTA, A. V. Et al. 2 D model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 8, 1995. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884695001662> Acesso em 14 jul 2018.

SALOMÃO, M.C.F.; SILVA, T.J. **Ensaio acelerado de carbonatação do concreto**. In: XII Seminário de iniciação científica. Universidade Federal de Uberlândia, 2008. Disponível em: <<https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/seg/cd2008/PDF/IC2008-0110.PDF>> Acesso em 20 mar 2018.

SHAIKH, F.U.A. Effect of Cracking on Corrosion of Steel in Concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40069-018-0234-y> Acesso em 16 mar 2019.

SHIMOMUKAY, R. **Modelos de previsão de vida útil para estruturas de concreto armado no estado de propagação da corrosão da armadura: estudo dos parâmetros intervenientes na modelagem**. Graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.

SILVA, M. D. **Avaliação quantitativa da degradação e vida útil de revestimentos de fachada – Aplicação ao caso de Brasília/DF**. 2014. Brasília: Universidade de Brasília.

SILVA, D.R. **Estudo de Inibidores de Corrosão em Concreto Armado visando melhoria na sua durabilidade**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2006. Disponível em: <<ftp://ftp.ufrn.br/pub/biblioteca/ext/bdtd/DjalmaRS.pdf>> Acesso em 28 mar 2018.

SILVA A. P., JONOV C.M.P. **Curso de especialização em construção civil**. Departamento de engenharia de materiais e construção. Minas Gerais, 2011. (Notas de Aula). Disponível em: <http://www.demc.ufmg.br/adriano/Manifest_%20Pat_2016.pdf>. Acesso em: 01 ABR 2018.

SOUZA, E. S. **Técnicas de recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. Monografia (Graduação). Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2014.

TERZIAN, P.; HELENE, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo, PINI / SENAI, 1993.

TUTIKIAN, B.; HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. In: ISAIA, G. C., ed. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo, IBRACON, 2011

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

VAGHETTI, M.A.O. **Estudo da corrosão do aço induzida por carbonatação em concretos com adições minerais**. Tese de doutorado. Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 2005.

VAN DER TOORN, A. **The maintenance of civil engineering structures**. Heron. v. 39, n. 4. 1994.

VAN DER TOORN, A. **The maintenance of civil engineering structures**. Heron. v. 39, n. 4, 1992.

WERLE, A. **Determinação de propriedades de concreto com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação**. Dissertação (Mestrado). Universidade Vale do Rio dos Sinos – RS. 2010.

APÊNDICE I – MEMORIAL DE CÁLCULOS

PRÉDIO 1

Pilar 1 – h=11,50 (furo)

1º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 6,5 = k \cdot \sqrt{44} \quad k = \frac{6,5}{\sqrt{44}} \quad k = 0,98 \text{ mm / ano}$$

2º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 31 = 0,98 \cdot \sqrt{t} \quad t = \left(\frac{31}{0,98} \right)^2 \quad t = 1000,80 \text{ Anos}$$

3º Etapa

$$t = 1000,80 \text{ Anos} - t = 44 \text{ Anos} = t = 957 \text{ Anos}$$

vida útil idade da edificação vida residual

Pilar 2-

1º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 5,0 = k \cdot \sqrt{44} \quad k = \frac{5,0}{\sqrt{44}} \quad k = 0,75 \text{ mm / ano}$$

2º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 32 = 0,75 \cdot \sqrt{t} \quad t = \left(\frac{32}{0,75} \right)^2 \quad t = 1802,24 \text{ Anos}$$

3º Etapa

$$t = 1802,24 \text{ Anos} - t = 44 \text{ Anos} = t = 1758 \text{ Anos}$$

vida útil idade da edificação vida residual

Pilar 3

1º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 3,4 = k \cdot \sqrt{44} \quad k = \frac{3,4}{\sqrt{44}} \quad k = 0,51 \text{ mm / ano}$$

2º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 32 = 0,51 \cdot \sqrt{t} \quad t = \left(\frac{32}{0,51} \right)^2 \quad t = 3897,58 \text{ Anos}$$

3º Etapa

$$t = 3897,58 \text{ Anos} - t = 44 \text{ Anos} = t = 3854 \text{ Anos}$$

vida útil idade da edificação vida residual

Pilar 4

1º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 29,34 = k \cdot \sqrt{44} \quad k = \frac{29,34}{\sqrt{44}} \quad k = 4,42 \text{ mm / ano}$$

2º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 42 = 4,42 \cdot \sqrt{t} \quad t = \left(\frac{42}{4,42} \right)^2 \quad t = 90,16 \text{ Anos}$$

3º Etapa

$$t = 90,16 \text{ Anos} - t = 44 \text{ Anos} = t = 46 \text{ Anos}$$

vida útil idade da edificação vida residual

Pilar 5

1º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 5,57 = k \cdot \sqrt{44} \quad k = \frac{5,57}{\sqrt{44}} \quad k = 0,84 \text{ mm / ano}$$

2º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 33 = 0,84 \cdot \sqrt{t} \quad t = \left(\frac{33}{0,84} \right)^2 \quad t = 1544,44 \text{ Anos}$$

3º Etapa

$$t = 1544,44 \text{ Anos} - t = 44 \text{ Anos} = t = 1500 \text{ Anos}$$

vida útil idade da edificação vida residual

Pilar 6

1º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 2,91 = k \cdot \sqrt{44} \quad k = \frac{2,91}{\sqrt{44}} \quad k = 0,44 \text{ mm / ano}$$

2º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 24 = 0,44 \cdot \sqrt{t} \quad t = \left(\frac{24}{0,44} \right)^2 \quad t = 2992,88 \text{ Anos}$$

3º Etapa

$$t = 2992,88 \text{ Anos} - t = 44 \text{ Anos} = t = 2949 \text{ Anos}$$

vida útil idade da edificação vida residual

PRÉDIO 2

Pilar 1

1º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 22,14 = k \cdot \sqrt{19} \quad k = \frac{22,14}{\sqrt{19}} \quad k = 5,08 \text{ mm / ano}$$

2º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 14 = 5,08 \cdot \sqrt{t} \quad t = \left(\frac{14}{5,08} \right)^2 \quad t = 7,60 \text{ Anos}$$

3º Etapa

$$t = 7,60 \text{ Anos} - t = 19 \text{ Anos} = t = -11 \text{ Anos / NULO}$$

vida útil idade da edificação vida residual

Pilar 2

1º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 16,88 = k \cdot \sqrt{19} \quad k = \frac{16,88}{\sqrt{19}} \quad k = 3,87 \text{ mm / ano}$$

2º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 22 = 3,87 \cdot \sqrt{t} \quad t = \left(\frac{22}{3,87} \right)^2 \quad t = 32,27 \text{ Anos}$$

3º Etapa

$$t = 32,27 \text{ Anos} - t = 19 \text{ Anos} = t = 13 \text{ Anos}$$

vida útil idade da edificação vida residual

Pilar 3

1º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 17,64 = k \cdot \sqrt{19} \quad k = \frac{17,64}{\sqrt{19}} \quad k = 4,05 \text{ mm / ano}$$

2º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 15 = 4,05 \cdot \sqrt{t} \quad t = \left(\frac{15}{4,05} \right)^2 \quad t = 13,74 \text{ Anos}$$

3º Etapa

$$t = 13,74 \text{ Anos} - t = 19 \text{ Anos} = t = -5 \text{ Anos / NULO}$$

vida útil vida de existência vida residual

PRÉDIO 3

Pilar 1

1º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 17,11 = k \cdot \sqrt{7,5} \quad k = \frac{17,11}{\sqrt{7,5}} \quad k = 6,25 \text{ mm / ano}$$

2º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 25 = 6,25 \cdot \sqrt{t} \quad t = \left(\frac{25}{6,25} \right)^2 \quad t = 16,01 \text{ Anos}$$

3º Etapa

$$t = 16,01 \text{ Anos} - t = 7,5 \text{ Anos} = t = 9 \text{ Anos}$$

vida útil idade da edificação vida residual

Pilar 2

1º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 15,45 = k \cdot \sqrt{7,5} \quad k = \frac{15,45}{\sqrt{7,5}} \quad k = 5,64 \text{ mm / ano}$$

2º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 15 = 5,64 \cdot \sqrt{t} \quad t = \left(\frac{15}{5,64} \right)^2 \quad t = 7,07 \text{ Anos}$$

3º Etapa

$$t = 7,07 \text{ Anos} - t = 7,5 \text{ Anos} = t = 0 \text{ Anos}$$

vida útil idade da edificação vida residual

Pilar 3

1º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 11,55 = k \cdot \sqrt{7,5} \quad k = \frac{11,55}{\sqrt{7,5}} \quad k = 4,22 \text{ mm / ano}$$

2º Etapa

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad 31 = 4,22 \cdot \sqrt{t} \quad t = \left(\frac{31}{4,22} \right)^2 \quad t = 54 \text{ Anos}$$

3º Etapa

$$t = 54 \text{ Anos} - t = 7,5 \text{ Anos} = t = 47 \text{ Anos}$$

vida útil idade da edificação vida residual

APÊNDICE II – FORMULÁRIO DE INSPEÇÃO PRELIMINAR⁵

Projeto:

Endereço:

Construtora:

Responsável pelas permissões de visita:

Data de visita e entrevista:

Data da análise de campo:

A) Informações Gerais

- Descrição da obra
- Materiais empregados na construção
- Área construída (m²)
- Período de construção
- Entrega da obra

B) Informações quanto à Estrutura de Concreto

- Período de construção (início e fim)
- Tipo de cimento
- Houveram problemas durante a execução da obra? Se sim, relacionar.
- Feita a estrutura, houve necessidade de reparos? Se sim, relacionar.

C) Materiais Requeridos

- Projeto da edificação

⁵ Fonte: TUTIKIAN, B.; PACHECO, M. **Boletim Técnico 1**. Inspeção, diagnóstico e prognóstico na construção civil. ALCONPAT: Mérida, 2013.