

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE PATOLOGIA E DESEMPENHO DAS CONSTRUÇÕES**

RAFAEL LANZARINI LEAL

**ANÁLISE DA VIDA ÚTIL RESIDUAL DE ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO
INSERIDA EM MEIO URBANO**

São Leopoldo

2019

RAFAEL LANZARINI LEAL

ANÁLISE DA VIDA ÚTIL RESIDUAL DE ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO

Artigo apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Patologia e Desempenho das Construções, pelo Curso de Especialização em Patologia e Desempenho das Construções da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Orientadora: Prof^a. MSc. Fernanda Pacheco

São Leopoldo

2019

ANÁLISE DA VIDA ÚTIL RESIDUAL DE ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO

ANALYSIS OF RESIDUAL LIFE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURE

Rafael Lanzarini Leal*

Fernanda Pacheco**

Resumo

O concreto, um dos produtos mais consumidos mundialmente, possui excelentes características de suporte à esforços de compressão, e quando combinado ao aço apresenta elevada resistência também as solicitações de tração, recebendo o nome de concreto armado. As barras de aço nele adicionadas, ficam passivadas devido à alta alcalinidade do concreto, proporcionando proteção contra a corrosão das armaduras. O dióxido de carbono presente na atmosfera com a presença de umidade, reage com os hidróxidos alcalinos presente na microestrutura do concreto, formando o carbonato de cálcio e conseqüentemente diminuindo o pH da estrutura, deixando as armaduras suscetíveis à corrosão. Este trabalho tem por objetivo analisar a vida útil residual de uma estrutura de concreto armado de uma edificação residencial datada dos anos 70, inserida em meio urbano, na cidade de Novo Hamburgo-RS, perante o avanço da frente de carbonatação. Para a análise, se extraiu o pó oriundo de furações realizadas em 8 pontos da estrutura no pavimento térreo, sendo três pontos localizados na parte externa da edificação, e outros cinco pontos localizados na garagem da edificação. A análise foi realizada através de aspersão de reagente químico fenolftaleína, no pó coletado através das furações e identificando assim a espessura da frente carbonatada, aplicando a fórmula da raiz quadrada de tempo, proposta por Tuutti, estipulando assim a vida útil residual da estrutura. Os resultados obtidos com a análise apontaram que em cinco pontos analisados a estrutura ultrapassou a vida útil de projeto estipulada pela atual norma de concreto armado, NBR 6118:2014 e outros três pontos a frente de carbonatação encontrou as barras de aço da estrutura.

Palavras-chave: Frente de carbonatação; Vida útil residual; patologia de construções.

Abstract

The concrete, one of the most consumed products in the world, has excellent characteristics to support compressive stresses, and when combined with steel also presents high tensile strength, receiving the name of reinforced concrete. The steel bars added to it are passivated due to the high alkalinity of the concrete, providing

* Engenheiro Civil, formado desde 2013, pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS r.lanzarini@yahoo.com.br.

** Professora orientadora Fernanda Pacheco. Engenheira Civil e Mestre pela UNISINOS, Professora na instituição e atual engenheira civil no itt Performance, fernandapache@unisinos.br

protection against reinforcement corrosion. The carbon dioxide present in the atmosphere with the presence of moisture reacts with the alkaline hydroxides present in the concrete microstructure, forming calcium carbonate and consequently decreasing the pH of the structure, leaving the reinforcement susceptible to corrosion. This work aims to analyze the residual useful life of a reinforced concrete structure of a residential building dating from the 70s, inserted in an urban environment, in the city of Novo Hamburgo-RS, facing the advancement of the carbonation front. For the analysis, dust from holes drilled in 8 points of the structure on the ground floor was extracted, being three points located on the outside of the building, and another five points located in the garage of the building. The analysis was performed by spraying phenolphthalein chemical reagent on the dust collected through the holes and thus identifying the carbonated front thickness, applying the Tuutti square root time formula, thus stipulating the residual useful life of the structure. The results obtained with the analysis showed that in five points analyzed the structure exceeded the design life stipulated by the current reinforced concrete standard, NBR 6118: 2014 and three other points ahead carbonation found the steel bars of the structure.

Keywords: Carbonation front; residual life; pathology of buildings.

1 INTRODUÇÃO

Os Romanos já utilizavam a cal como aglomerante desde 600 a.C em suas construções, mas o grande avanço construtivo aconteceu com a descoberta de um novo material, originado da adição de cinzas pozolânicas a argamassa de cal, produzindo o *Opus Caementicium*, uma material semelhante ao cimento atual (NOGUEIRA, 2008).

Segundo produto mais consumido mundialmente, perdendo somente para o consumo de água, o concreto de cimento Portland tem tal uso devido às suas características de plasticidade, facilidade de obter diversas formas arquitetônicas quando ainda em estado fresco, elevada resistência à água, alta disponibilidade dos materiais constituintes e seu baixos custos (PEDROSO, 2009).

Foi o francês Joseph Louis Lambot, considerados por muitos como o pai do concreto armado, no ano de 1850 que efetuou as primeiras experiências práticas dos efeitos da introdução de aço à massa do concreto, utilizando malhas finas de arame entrelaçados na construção de canoas de concreto, facilitando na confecção de tais peças, pois esta prática dispensava a utilização de formas e também combatia a fissuração (KAEFE, 1998).

As barras de aço quando expostas em meio alcalinos, como no caso dos concretos, que tem valor de potencial hidrogeniônico (pH) na ordem de 12 a 13, passam a contar com a formação de uma camada passivadora formada por uma fina película de óxido fortemente aderida a superfície da barra, protegendo desta maneira contra corrosão (FERREIRA et al., 2017).

A corrosão do aço das estruturas em concreto armado é a manifestação patológica mais recorrente neste tipo de estrutura, devido ao envelhecimento precoce delas (LEVY; HELENE, 2004). As principais causas da despassivação e corrosão das armaduras submersas no concreto, são ocasionadas pela frente de carbonatação e ataques por cloretos (PACHECO, 2016).

Ainda conforme a mesma autora, a carbonatação ocorre devido a reação entre o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera com os compostos alcalinos existente no concreto, formando o ácido carbônico (H_2CO_3) que por sua vez reage com hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ da pasta de cimento, formando cristais de carbonato de cálcio (CaCO_3) resultando em uma acentuada diminuição do pH da estrutura.

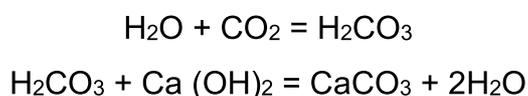
A barras de aço quando inseridas em meio não alcalinos, podem despassivar ficando suscetíveis ao processo de corrosão, ocasionando manchas, fissuras deslocamento de pedaços de concreto, perda de seção resistente podendo levar a estrutura ao colapso (LEVY; HELENE, 2004)

No ano de 2013 entrou em vigor no Brasil a Norma Desempenho, NBR 15575, visando atender os requisitos dos usuários das edificações no que tange o desempenho mínimo aceitável e vida útil dos diversos sistemas construtivos que compõem uma edificação habitacional. Tal norma estipula como Vida Útil de Projeto – VUP, das estruturas principais (vigas, pilares, lajes e outros) de concreto armado, no mínimo em 50 anos.

Assim, torna-se obrigatória a durabilidade mínima do concreto, mesmo que inserido em regiões de elevada agressividade ambiental. Neste sentido, o presente trabalho avaliou a vida útil residual de estruturas de concreto armado inseridas em classe urbana, através do ensaio de frente de carbonatação por análise colorimétrica e aplicação do modelo de Tuutti (1982).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O gás carbônico CO_2 é um composto fartamente existente na atmosfera, e em grandes centros urbanos a concentração deste composto alcança quantidades mais significativas. Com a existência de umidade, este gás se dissolve na cadeia de poros de estruturas de matriz cimentícias, formando o ácido carbônico H_2CO_3 , que reagem com os compostos álcalis do concreto, em especial o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), formando o carbonato de cálcio (CaCO_3) e água, como na fórmula a seguir proposta por Carmona (2005), onde:



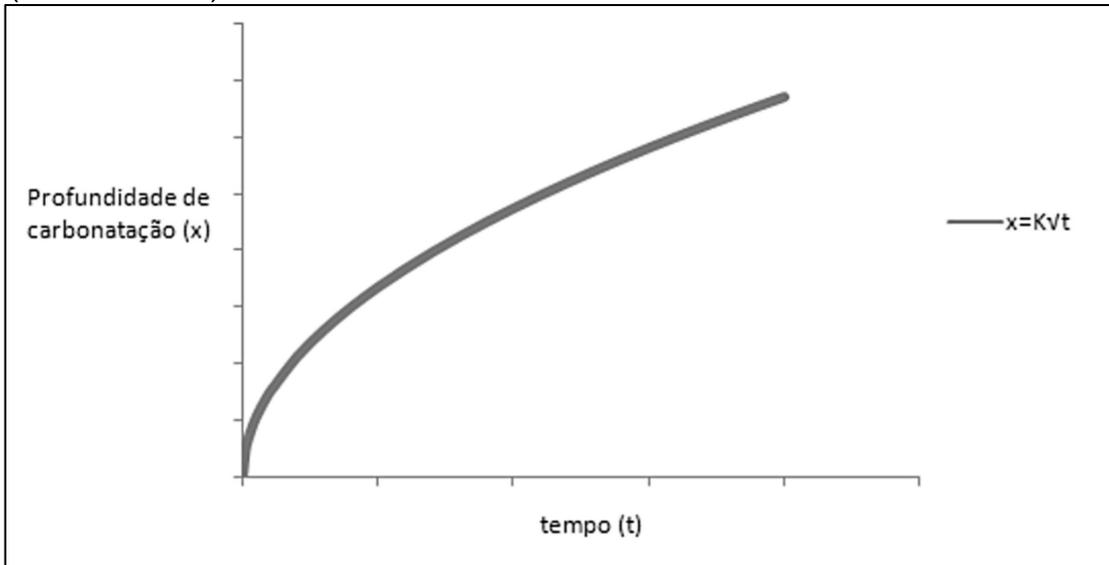
O processo de carbonatação por si só, não representa malefício ao concreto, pois o carbonato de cálcio precipitado durante o processo, colmata os microporos do concreto, conferindo à estrutura maior resistência a compressão axial e melhoramento de sua permeabilidade (CAFANGE, 2012).

A formação do carbonato de cálcio reage com os álcalis da pasta das estruturas cimentícias, reduzindo o potencial hidrogeniônico (pH) da estrutura, que quando íntegros são extremamente básicos, entre 12,6 e 13,50 (NEVILLE, 2012), baixando para níveis que tornam as barras de aço despassivadas quando atingidas pelo avanço da carbonatação (LACERDA et al., 2017)

2.1 Frente de carbonatação

O avanço da frente de carbonatação é diretamente associado à facilidade, que o dióxido de carbono CO_2 tem de penetrar na estrutura, seja pelos poros, fissuras ou meio ambiente inserido (MEIRA; PADARATZ; JUNIOR, 2006). Helene (1986) descreveu que o processo evolutivo do avanço da frente de carbonatação pode se estancar com o decorrer do tempo, ocasionado pelo aumento da consistência da estrutura, devido a sedimentação de produtos da carbonatação e hidratação, dificultando a penetração do dióxido de carbono CO_2 . A Figura 1 apresenta a evolução da profundidade de carbonatação ocorrendo ao longo do tempo.

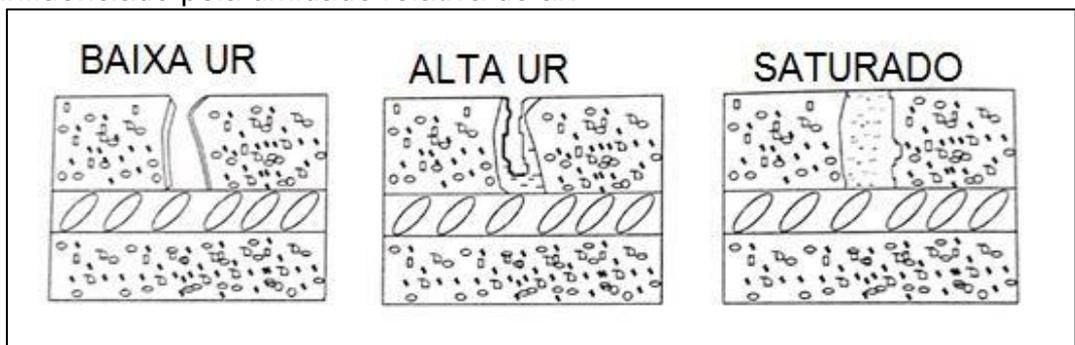
Figura 1 – Profundidade de carbonatação em função do tempo por previsão simplificada e endossada no modelo de vida útil das armaduras de Tuutti (SIMAS, 2007).



Fonte: Adaptado por Cafange (2011), p. 53.

Para que este fenômeno ocorra é indispensável a presença de umidade na rede capilar existente na microestrutura do concreto, se os poros estiverem saturados o avanço da frente de carbonatação é afetado devido à baixa velocidade de difusão do CO_2 na água, quando os poros do concreto estão secos, o CO_2 penetra na estrutura porém a carbonatação não ocorre devido a falta da existência de água, já com os poros parcialmente umedecidos ocorre o avanço da frente de carbonatação. A umidade relativa do ar influencia diretamente a quantidade de água no interior dos poros do concreto, contribuindo desta forma para o avanço da frente de carbonatação (PAZZINI, 2005; ISAIA, 2005).

Figura 2 – Umidificação dos poros de estruturas de concreto armado influenciado pela umidade relativa do ar.



Fonte: ISAIA (2005), p. 836.

Na camada de cobertura das estruturas de concreto, é comum que seus poros estejam parcialmente saturados, tornando a condição favorável para o avanço da carbonatação até a profundidade onde os poros apresentem esta condição (MEIRA; PADARATZ; JUNIOR, 2006). A Figura 3 apresenta através de um esquema como ocorre o processo de agressão pela penetração de dióxido de carbono.

Em condições de exposição natural ao CO_2 (0,03% a 1%), um concreto produzido com relação água/cimento controlada, abaixo de 0,50, pode levar mais de 20 anos para que se possa determinar a velocidade de carbonatação. (KOBUKU; NAGATAKI, 1989). Conforme Cascudo e Carasek (2011), o gradiente entre o teor de concentração de CO_2 na atmosfera de um ambiente externo para um ambiente interno, intensifica a velocidade de penetração da frente de carbonatação na estrutura. Tais fatores podem ser percebidos pela Figura 4.

Figura 3 – Avanço da frente de carbonatação no concreto armado.

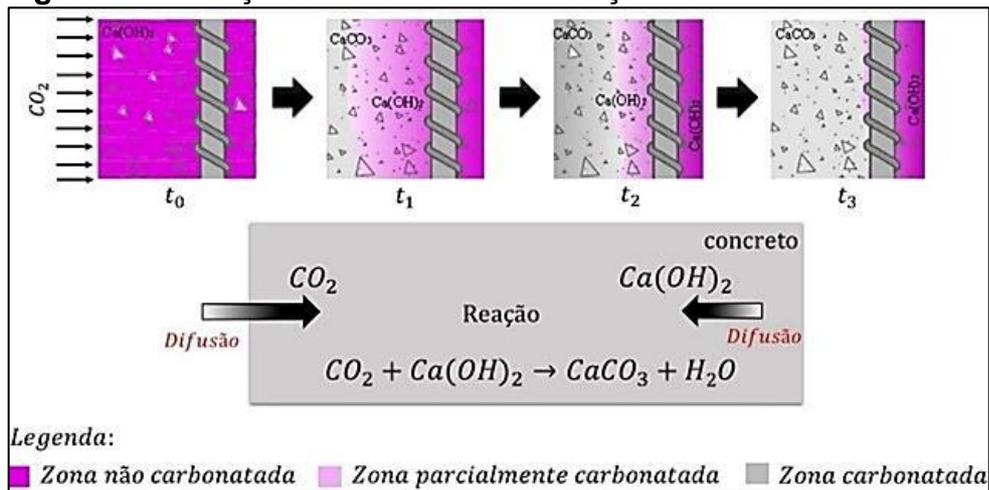
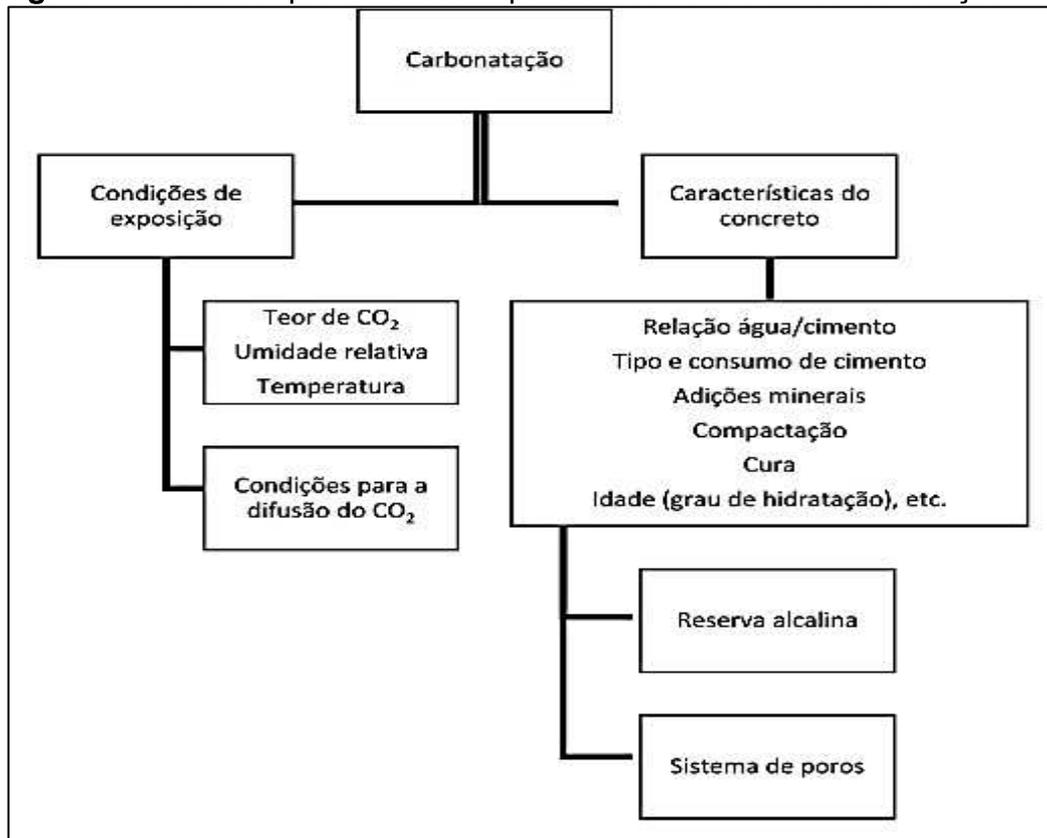


Figura 4 – Fatores que contribuem para a ocorrência da carbonatação.



Fonte: Cascudo e Carasek (2011) adaptado por Pacheco (2016), p. 47.

As equações propostas por Carmona (2005) e Tuutti (1982), que modelaram a frente de carbonatação em estruturas de concreto através do método proposto por Crank (1975) da particularização do cálculo de difusão com fronteiras móveis, são indicados abaixo nas fórmulas 1, 2 e 3, sendo:

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

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

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

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 CO₂ no material (Kg/m³);

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

D_{CO_2} = Coeficiente de difusão de CO₂ (m²/s);

e = Profundidade de carbonatação (mm);

t = Tempo (anos).

2.2 Durabilidade e vida útil (VU)

Durabilidade e vida útil são dois conceitos distintos no que tange a longevidade de um determinado material, em um passado recente, o conceito de durabilidade era somente considerado em projetos e nas construções de modo qualitativo (HELENE; TUTIKIAN, 2005). Para Silva Filho (2019) durabilidade está associada diretamente às propriedades de um material inserido em um determinado ambiente.

Vida útil está ligada diretamente à quantidade de tempo e do aporte financeiro despendido para que um material se torne um produto, justificando assim sua viabilidade econômica e financeira para todo o tempo de uso para qual foi projetado, nesse sentido, quando falamos em edificações devemos adotar o conceito de vida útil.

Não é antigo o pensamento de que as obras e estruturas em concreto armado seriam eternas, sem a necessidade de realização de nenhum tipo de manutenção, bastando serem projetadas e executadas com honestidade e ética profissional, somente nas últimas décadas a comunidade internacional desenvolveu ferramentas possibilitando prever, quantificar e calcular a vida útil das estruturas executadas em concreto (HELENE; TUTIKIAN, 2005).

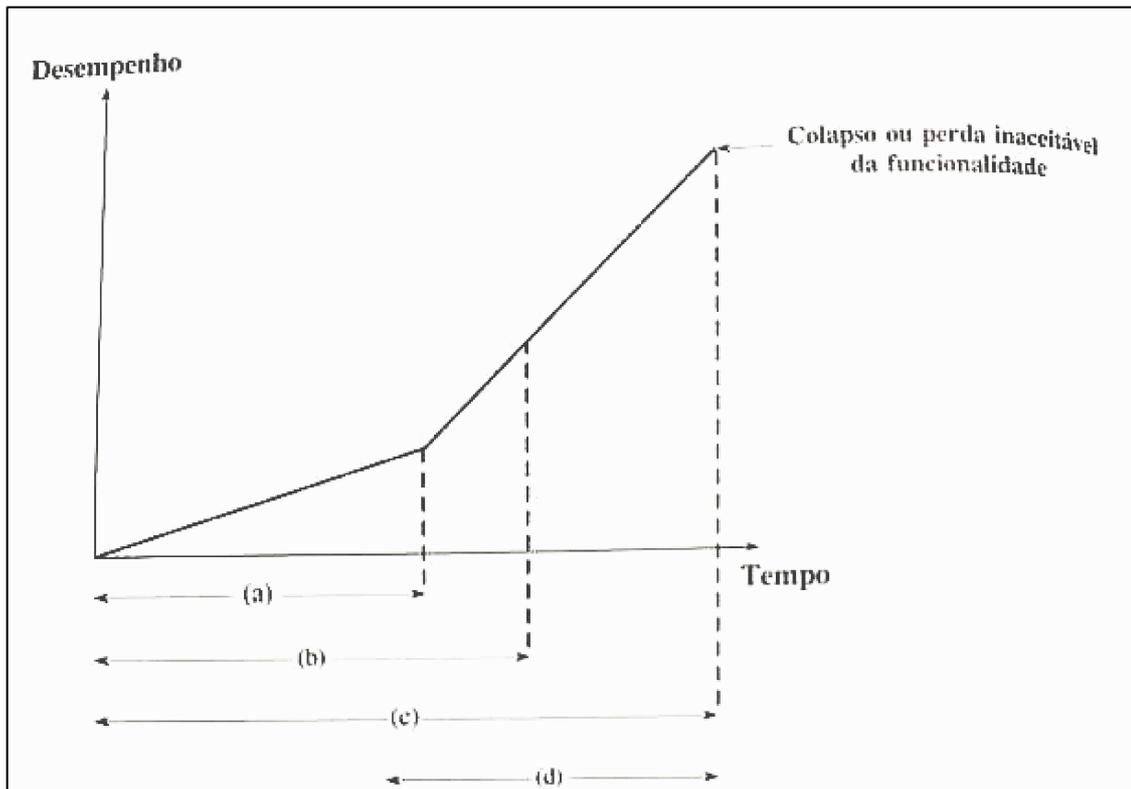
Antonoff (2016) definiu a vida útil como sendo o intervalo de tempo em que um produto, sistema ou componente atinge ou ultrapassa a performance mínima necessária para o qual foi projetado. Para que as edificações alcancem os níveis mínimos de desempenho durante sua vida útil, cabe aos projetistas, incorporador e/ou proprietário, definir previamente já em projeto os cuidados e materiais a serem utilizados na sua composição estabelecendo desta forma a vida útil de projeto (VUP).

A Norma Brasileira de Desempenho, NBR 15.575 estabelece parâmetros mínimos de desempenho aos diversos sistemas construtivos de edificações habitacionais, sendo a durabilidade um desses parâmetros. A referida norma estipula a vida útil de projeto (VUP) para estruturas de um prédio residencial um período mínimo de 50 anos (ABNT, 2013).

Quando as barras de aço existentes nas estruturas de concreto armado ficam despassivadas, sujeitas ao desenvolvimento de processos corrosivos, podemos considerar então que a estrutura atingiu naquele exato momento o limite da sua Vida Útil de Projeto (VUP) (MEDEIROS et al., 2017).

Na década de 90 (HELENE, 1993) definiu claramente a relação de vida útil de estruturas de concreto armado limitada à corrosão das barras de aço da estrutura, modelado por Tutti (1982) em sua tese de doutorado, no entanto os demais fenômenos de deterioração das estruturas, não existem propostas nacionais e internacionais.

Figura 5 – Modelo de vida útil das estruturas pelo conceito de corrosão da armadura.



Legenda: (a) **Vida útil de projeto:** período que os agentes agressivos ainda estão penetrando nos micro poros; (b) **Vida útil de serviço ou utilização:** os agentes agressivos começam a causar danos perceptíveis na estrutura; (c) **Vida útil total:** momento exato de ruptura, colapso parcial ou total da estrutura; (d) **Vida útil residual:** momento em que após uma vistoria ou intervenção na estrutura a mesma tenha condições de desenvolver suas funções para a qual foi concebida. **Fonte:** Helene e Andrade (2007), p. 926.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho tem por objetivo analisar o avanço da frente de carbonatação e estipular a vida útil residual da estrutura de concreto armado de um condomínio situado na cidade de Novo Hamburgo – RS, através de realização de ensaio semi-destrutivo de colorimetria, por aspersão de reagente químico, fenolftaleína, na poeira de concreto coletado no processo de furação da estrutura.

3.1 Objeto de estudo

O Condomínio Edifício Alvorada está localizado no entorno do “Corredor Cultural da Cidade de Novo Hamburgo”, uma área de valor histórico, situada no centro da cidade, com construções datadas dos séculos 19 e 20. A edificação tem seus projetos datados do ano de 1968, tendo a carta de habite-se expedida pela Prefeitura Municipal de Novo Hamburgo nos anos 1971 para as unidades habitacionais e comerciais e no ano de 1973 para as garagens/boxes. O sistema construtivo utilizado na edificação é de viga pilar, com paredes de vedação em blocos cerâmicos maciço e em blocos cerâmicos vazados. A utilização do edifício é de uso misto (residências, escritórios e lojas comerciais) composta por um andar térreo onde estão localizadas 9 lojas e as garagens do condomínio, compostas por 18 vagas de estacionamento, mais nove pavimentos com 5 apartamentos por pavimentos, distribuídas em 7.512,98 m² de área construída.

A edificação está inserida em uma região de intenso fluxo de veículos automotores localizada na região central da cidade de Novo Hamburgo – RS, nas esquinas da Rua Bento Gonçalves com a Rua Mariano de Matos. A Figura 6 apresenta a localização da edificação analisada e a Figura 7 complementa sua apresentação apontando para a fachada.

Figura 6 – Localização da edificação analisada.



Fonte: Sistema de Informação Geográfica de Novo Hamburgo (SIGNH, 2019).

Figura 7 – Condomínio edifício Alvorada.



Fonte: Autor.

3.2 Procedimento experimental

A medição do avanço da frente de carbonatação, foi realizada através de ensaio semi-destrutivo colorimétrico, através de aspersão de solução de reagente químico fenolftaleína à 1%, no pó de concreto coletado através de furação da estrutura em pontos previamente determinados. Foram escolhidos 8 pontos de análise, situados em pilares do pavimento térreo, sendo três pilares e duas vigas localizados na garagem do condomínio, denominados como P1, P2, P3, V1 e V2, e outros três pilares localizados na parte externa da edificação, sendo dois pilares na fachada sul, voltada para a Rua Mariano de Matos, denominado P4 e P5 um pilar localizado na fachada norte, voltada para a Rua Bento Gonçalves, denominado como P6, em todos os pilares analisados a furação foi realizada a 1,45 m de altura (Figura 8).

Em cada ponto analisado, adotou-se os devidos cuidados na limpeza da ponta da broca utilizada, evitando a contaminação de resíduos do concreto de um ponto para outro ponto da análise. Inicialmente escaneou-se os trechos de análise com equipamento de detecção de partículas eletromagnética, marca Bosch modelo D-Tect 150, identificando o posicionamento e profundidade das barras de aço da estrutura. Posteriormente, com a utilização de um martelo tipo pena, se removeu um trecho de reboco, possibilitando desta forma mensurar com um paquímetro a sua espessura.

Figura 8 – Medições em pontos analisados.



Fonte: Autor.

Subtraiu-se os valores da espessura de reboco, dos valores aferidos com o escâner, obtendo desta maneira o nível exato da profundidade das barras de aço recobertas somente com a camada de concreto. A Figura 9 apresenta as ferramentas utilizadas no processo. O escaneamento citado é apresentado na Figura 10.

Figura 9 – Materiais e ferramentas utilizadas.



Fonte: Autor.

Figura 10 – Furação com coleta de pó e escaneamento da estrutura.



Fonte: Autor.

Antes do início da furação, foi utilizado um pequeno pincel para “espanar” possíveis contaminações entre a poeira do reboco escarificado, com a poeira do concreto a ser coletada e analisada. A perfuração da estrutura para coleta do pó foi realizada com uma broca de vídea de 6 mm, fixada em uma furadeira de impacto marca Dewalt modelo D25133k com régua acoplada, permitindo controlar a profundidade do furo. A aspersão da solução de fenolftaleína ocorreu a cada 5 mm de profundidade de coleta. Conhecendo a profundidade dos pontos de viragem do indicador químico, utilizou-se a equação 3, da raiz quadrada do tempo, apresentada por TUUTTI (1982), para estipular o avanço da frente de carbonatação na estrutura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A norma técnica de concreto armado vigente na época da construção da edificação era a NB-1:1940, que estipula em seu Art.37 como espessura mínima de cobrimento de concreto das barras de aço, em vigas e pilares expostos ao “ar livre” em 2 cm, e estas mesmas estruturas no interior da edificação em 1,5 cm. Já a atual norma de concreto armado, NBR 6118 (ABNT, 2014), estipula um cobrimento mínimo de 3 cm de concreto sobre as barras de aço para vigas exposta em ambiente de agressividade moderada, que é a situação da obra analisada (Tabela 1).

Tabela 1 – Espessura de cobrimento encontrado nas estruturas analisadas.

PONTO	LOCALIZAÇÃO	<i>e</i> ESCANEAMENTO	<i>e</i> REBOCO	<i>e</i> COBRIMENTO
		(mm)	(mm)	(mm)
P1	Garagem	18	10	8
P2	Garagem	32	12	20
P3	Garagem	41	12	29
P4	Rua Mariano de Matos	37	20	17
P5	Rua Mariano de Matos	41	29	12
P6	Rua Bento Gonçalves	39	21	18
V1	Garagem	38	10	28
V2	Garagem	19	11	8

Fonte: Autor.

Para demonstrar os pontos de virada obtidos com a aspersão do reagente químico, elaborou-se a Tabela 2, demonstrando a profundidade do avanço da frente de carbonatação e consequente virada da coloração da fenolftaleína de cinza para magenta (Figura 11).

Tabela 2 – Profundidade de virada do reagente químico.

Profundidade (mm)	P1 Garagem	P2 Garagem	P3 Garagem	P4 Mariano de Matos	P5 Mariano de Matos	P6 Bento Gonçalves	V1 Garagem	V2 Garagem
5	Cinza	Cinza	Cinza	Cinza	Cinza	Cinza	Magenta	Cinza
10	Cinza	Cinza	Magenta	Cinza	Magenta	Magenta	-----	Magenta
15	Cinza	Magenta	-----	Cinza	-----	-----	-----	-----
20	Cinza	-----	-----	Magenta	-----	-----	-----	-----
25	Cinza	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
30	Cinza	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
35	Cinza	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
40	Cinza	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
45	Magenta	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Fonte: Autor.

Figura 11 – Amostra das coleta e aspersão do reagente químico.



Fonte: Autor.

Conforme já relatado anteriormente, os projetos da edificação estão datados de 1968, com carta de habite-se expedida para as unidades habitacionais e comerciais no ano de 1971 e para as garagens e box o ano de 1973, adotando então para fins de cálculo de vida útil residual da estrutura, 48 anos nos pontos P4, P5 e P6 e para os demais pontos, que estão localizados na garagem, 46 anos.

A NB-1 de 1940 não aborda a questão de vida útil das estruturas tampouco estabelece valores de difusão de gás carbônico (KCO_2) no interior das estruturas, no entanto estabelece valores mínimos de cobrimento de concreto para estruturas em ambientes internos e externos em 2 cm, sem considerar a classe de agressividade do meio em que está inserida. Com o conhecimento da profundidade carbonatada e o conhecimento da idade da edificação, utilizando a fórmula sugerida por Tutti (1982), foi possível estipular a velocidade de difusão do CO_2 no interior da estrutura (KCO_2).

Tabela 3 – Velocidade de difusão de gás carbônico (KCO_2) no interior da estrutura.

Ponto Analisado	Avanço da frente de carbonatação (mm)	Idade da estrutura (anos)	KCO_2 m/s 1/2
P1	45	46	6,635
P2	15	46	2,212
P3	10	46	1,474
P4	20	48	2,887
P5	10	48	1,443
P6	10	48	1,443
V1	5	46	0,737
V2	10	46	1,474

Fonte: Autor.

Com o valor de KCO_2 encontrado, utilizou-se novamente a fórmula de Tutti ($e=KCO_2 \cdot \sqrt{t}$), isolando a variável " \sqrt{t} " e utilizando os valores encontrados na espessura de cobrimento das barras de aço, obtemos o valor estimado da vida útil total da estrutura. Subtraindo a quantidade de anos que o prédio está em uso, tornou-se possível encontrar o valor da Vida Útil Residual da edificação, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Vida Útil Residual da edificação.

Ponto analisado	Espessura cobrimento (mm)	KCO ₂ m/s 1/2	Idade da estrutura (anos)	Vida útil total da estrutura	Vida útil residual da estrutura
P1	8	6,635	46	1,454	-44,546
P2	20	2,212	46	81,778	35,778
P3	29	1,474	46	386,86	340,860
P4	17	2,887	48	34,68	-13,320
P5	12	1,443	48	69,12	21,120
P6	18	1,443	48	155,52	107,520
V1	28	0,737	46	1442,56	1396,560
V2	8	1,474	46	29,44	-16,560

Fonte: Autor.

Dentre os oito pontos de análise, três pontos encontraram-se com a armadura despassivada, dois localizados no interior da garagem (P1 e V2) e o terceiro ponto (P4) localizado no lado externo da edificação, situado no logradouro da Mariano de Matos. Todos os demais pontos analisados apontaram valores de vida útil residual muito além do que a atual NBR 6118 estima como valor aceitável no tocante a vida útil das estruturas de concreto, o que pode ser visivelmente comprovado numa inspeção visual na edificação, que não aponta sinais visíveis de degradação, como manchas, sinais de corrosão, fissuração elevada na estrutura entre outros.

Outro aspecto importante é a ponderação do método utilizado para estimar o avanço da frente de carbonatação, pois os testes foram realizados a cada 5 mm de profundidade, o que pode distorcer os reais valores da profundidade de penetração de CO₂ na estrutura. No P4 e V2, que apontaram uma vida útil residual negativa de -13,32 e -16,56 anos por exemplo, onde a penetração de CO₂ foi identificada a uma profundidade de 20 e 10 mm respectivamente, poderiam ter seus resultados de vida útil residual na faixa 6,18 e 35,79 anos, caso a frente carbonatada estivessem a uma profundidade de 16 e 6 mm de profundidade em cada um dos pontos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos com os pontos amostrados, explicitaram a importância que o controle na espessura da camada de concreto de cobrimento das armaduras exerce sobre a longevidade e durabilidade em estruturas de concreto armado. Nos oito pontos analisados, independentemente da localização dos pilares, quanto menor

foi a espessura da camada de concreto de cobrimento, menor foi a idade de vida útil residual da estrutura.

O método utilizado para determinar a velocidade de difusão de CO₂ no interior da estrutura, $e=KCO_2\sqrt{t}$, demonstrou que em três pontos analisados, P1, P4 e V2, atingiram a vida útil de projeto precocemente, 1,45 anos, 34,68 anos e 29,44 anos respectivamente, não alcançando os valores mínimos estipulado pela atual norma de concreto NBR6118:2014, assim mesmo não apresentaram sinais visuais de deterioração da peça, tais como manchas, fissuras ou deformação.

Também se observa que o método utilizado para definir profundidade do avanço da frente de carbonatação, através de coleta de poeira de concreto oriunda da perfuração na estrutura, é muito sensível ao intervalo adotado para coleta e análise da poeira, sendo o ideal analisar através de extração de testemunhos, sempre quando possível. Os demais pontos analisados, apresentaram excelentes resultados quanto ao avanço da frente de carbonatação, apresentando Vida útil residual elevadíssima, atingindo os níveis de desempenho superior conforme estimado pela NBR 15575:2013.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONOFF, F. F. **O conceito de vida útil e o projeto do envelope de edifícios residenciais**. 2016. 72 f. Monografia (Especialização em Gestão de Projetos na Construção) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Poli-Integra, São Paulo, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-1: Edificações Habitacionais: desempenho, parte 1, requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2014 Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2014.

CAFANGE, D. M. P. J. **Estudo de métodos e medidas auxiliares para o controle da resistência à carbonatação de concretos estruturais de cimento Portland**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2nd ed, 1975.

CARMONA, T. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação**. 2005. 103 f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ação da carbonatação no concreto. In: (Org.) ISAIA, G. C. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 849-887, 2011.

FERREIRA, P. R. R.; MEIRA, G. R.; BARBOSA, D. C.; CARVALHO, M.; ANDRADE, J. INFLUÊNCIA DO GRAU DE CORROSÃO DAS ARMADURAS NA EFICIÊNCIA DO MÉTODO DE REALCALINIZAÇÃO PARA TRATAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO CARBONATADAS. **HOLOS**, v. 7, p. 69-80, 2017.

SILVA FILHO, L. C. P. **As exigências da vida útil dos edifícios**. AECweb https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/as-exigencias-da-vida-util-dos-edificios_5219_10_20. Acesso em: 18 de julho de 2019.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. In: (Org.) ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 905-944, 2007.

HELENE, P.; TUTIKIAN, B. Dosagem dos concretos de cimento Portland. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 439-471, 2005.

HELENE, P. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. [S.l: s.n.], 1986.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de cimento Portland. In: (Org.) ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 905-944, 2007.

ISAIA, G.C. **CONCRETO, Ensino, Pesquisa e Realizações**. IBRACON: São Paulo, 2005, 1.600 p.

KAEFER, L. F. **PEF 5707 - Concepção, projeto e realização das estruturas: aspectos históricos: a evolução do concreto armado**. São Paulo: 1998.

KOBUKU, M.; NAGATAKI, S. Carbonation of concrete with fly ash and corrosion of reinforcement in 20 years test. In: MALHOTRA, V. M (Ed.) **International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 3rd, Trondheim, 1989**. Proceedings... Detroit: American Concrete Institute, 2 v., v. 1, p. 315-329, 1989.

LACERDA, E.; MAGALHÃES, A. G.; BERNARDES, E. E.; NUNES, E. H. M.; VASCONCELOS, W. L. Monitoring the carbonation front progress in a cementitious composite having its pore structure analyzed through μ -CT imaging. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v.10, n.3, 653–668, 2017.

LEVY, S. M.; HELENE, P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. **Cement and concrete research**, v. 34, n. 11, p. 1975-1980, 2004.

MEDEIROS, M. H. F.; ROCHA, F. C.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; HELENE, P. Corrosion potential: influence of moisture, water-cement ratio, chloride content and concrete cover. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v.10, n. 4, p. 864-885, 2017.

MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J.; JÚNIOR, J. C. B. Carbonatação natural de concretos: resultados de cerca de quatro anos de monitoramento. **XI Encontro Nacional de Tecnologia Do Ambiente Construído**, n. 1, 9p, 2006.

MONTEIRO, P. J. M.; HELENE, P.; KANG, S. H. Designing concrete mixtures for strength, elastic modulus and fracture energy. **Materials and Structures**, v. 26, n. 8, p. 443-452, 1993.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 5th edition. Pearson Education Limited, Harlow, England, 2012. 872 p.

PACHECO, F. **Investigação da relação entre os parâmetros de projeto das estruturas de concreto armado visando à durabilidade**. 2016. 185 f. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, 2016.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto e construções**, v. 53, p. 14-19, 2009.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 265 f. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SIMAS, M. S. L. Sistemas de proteção do betão face à carbonatação. In: Instituto superior técnico, **Discusión of Principal Paper on Carbonation of Concrete by Hamada**. International Conference on Chemistry of Cement. 2007. p. 384-396.

SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA DE NOVO HAMBURGO (SIGNH). <https://signh.novohamburgo.rs.gov.br/>. Acesso em: 24 de julho de 2019.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. 504 p. Ed. Stokholm: Swedish Cement and Concrete research, 1982.