

CARBONATAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

CARBONATING IN CONCRETE STRUCTURE

Lucas Albuquerque RODRIGUES¹, Adilson Côrte Souza JÚNIOR²

Recebido em 01 de junho de 2019; Aceito em 31 de junho de 2019; Disponível *on line* em 12 de julho de 2019

Resumo: Com a preocupação de preservar a vida útil da estrutura de concreto armado, muitos estudos na área de patologia e corrosão tem avançado nos últimos anos, entre elas a carbonatação, que na prática é um processo físico-químico que provoca mudança na microestrutura e na diminuição do pH, entre eles estão a concentração de CO₂ no ambiente, percentual de umidade do ar, temperatura a que a estrutura está submetida, dos condicionantes do concreto, composição da mistura e sua estrutura de poros. O objetivo deste trabalho é mostrar os processos de carbonatação, mostrando o efeito, a velocidade, os fatores, as medidas, e a retração, além de mostrar os tipos de proteção e prevenções usadas para minimizar esse processo corrosivo. Utilizou-se, como método de sua realização revisão literária, para entender as causas e efeitos, além de um estudo de caso na cidade de Camboinha-Cabedelo (PB) a qual foram realizados os testes de identificação da redução do pH por meio da fenolftaleína, para com isso realizar o processo de recuperação da estrutura. Constatando-se que o processo de execução e a falta de controle tecnológico do material, são os grandes influenciadores dos processos de manifestações patológicas, além do fator do cobrimento das estruturas que serve como barreira contra o avanço da umidade e agentes agressivos, além de garantir a passivação da armadura.

Palavras-chave: Patologia; Concreto Armado; Corrosão; pH do concreto.

Abstract: With the concern of preserving the useful life of the reinforced concrete structure, many studies in the area of pathology and corrosion have advanced in recent years, among them carbonation, which in practice is a physicochemical process that causes changes in microstructure and decrease of the pH, among them are the concentration of CO₂ in the environment, percentage of air humidity, temperature at which the structure is submitted, the concrete conditioners, composition of the mixture and its pore structure. The objective of this work is to show the carbonation processes, showing the effect, velocity, factors, measurements, and retraction, as well as showing the types of protection and preventions used to minimize this corrosive process. A literature review was used to understand the causes and effects, as well as a case study in the city of Camboinha-Cabedelo (PB), which carried out the tests to identify the pH reduction by means of phenolphthalein , in order to carry out the structure recovery process. It is observed that the execution process and the lack of technological control of the material are the major influencers of the processes of pathological manifestations, besides the factor of covering of the structures that serves as a barrier against the advance of the humidity and aggressive agents, besides guaranteeing the passivation of the armature.

Keywords: Pathology; Armed Concrete; Corrosion; pH of the concrete.

¹ Engenheiro Civil, pelo Centro Universitário de João Pessoa. Pós Graduado, em MBA em Engenharia de Edifícios até 4 pavimentos, pelo Centro Universitário da Grande Dourados. E-mail: lucasalbuqrodri@hotmail.com

² Engenheiro Civil, pela Universidade Federal de Pelotas (UFPEL). Pós graduado em Gestão de Projeto.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material utilizado na construção civil composto por agregados graúdos (pedras britadas, seixos rolados), agregados miúdos (areia natural ou artificial), aglomerantes (cimento), água, adições minerais e aditivos (aceleradores, retardadores, fibras, corantes) (PORTO; FERNANDES, 2015).

A deterioração e a corrosão são os principais agentes que comprometem a durabilidade e a vida útil da estrutura de concreto armado, entre as causas de deterioração destaca-se a: lixiviação, ataque por sulfatos, reação álcali-agregado, entre outros, já entre as patologias que provocam a corrosão de armaduras destacam-se os ataques de cloreto e a carbonatação. (FERREIRA, 2013)

Entre as vantagens do concreto armado estão: i) adaptação a qualquer forma; ii) economia nas construções pela possibilidade de obtenção de materiais nas proximidades da obra, como por exemplo, concreteiras e lojas de materiais de construções; iii) facilidade de execução, através do avanço tecnológico para execução de fôrmas e escoramento; iv) os custos de manutenção das estruturas de concreto são baixos, quanto atendidos os requisitos das normas técnicas pertinentes; v) boa resistência a choques, vibrações e altas temperaturas; vi) a resistência à compressão do concreto aumenta com a idade (CLÍMACO, 2008).

As desvantagens mais marcantes do concreto armado como materiais estruturais de acordo com Clímaco (2008) são: i) peso próprio elevado (massa específica=2500 kg/m³); ii) fissuração inerente à baixa resistência à tração; iii) consumo elevado de fôrmas e escoramento e execução lenta; iv) dificuldade em adaptação e alterações significativas nos projetos exigindo revisões do projeto estrutural, o que implica, muitas vezes, a necessidade de reforço da estrutura; v) as condições de agressividade ambiental vão determinar, em cada caso, a espessura da

camada de cobrimento de concreto para a proteção das armaduras.

As propriedades da estrutura de concreto estão relacionadas com seu processo construtivo (planejamento/projeto, materiais, execução e utilização/manutenção), e por não precisar de uma mão de obra tão qualificada para sua execução e pela falta atenção do meio técnico-científico, a manutenção de estrutura e a melhoria desses processos cresceu como garantia da vida útil da obra (ANDRADE, 1997).

Com a preocupação da degradação do concreto e a corrosão das armaduras, Possan (2010), analisou dois modelos para sua preservação, uma determinística e a outra probabilística: os modelos determinísticos que fornecem as estimativas máxima ou média da degradação e a probabilístico onde se considera a probabilidade de ocorrência dos principais fatores que afetem o fenômeno de degradação em estudo. O Autor (2010) também afirma que dentre os processos de iniciação das corrosões das armaduras, a carbonatação, destaca-se que o ingresso do CO₂ através do concreto depende de inúmeros fatores: matérias de construção, processo construtivo, e as condições ambientais no local em que a estrutura está construída.

A medição de carbonatação do concreto são efetuadas através de indicadores de pH colorimétrico – fenolftaleína (valores carbonatadas de cor rosada para pH entre 8,3 e 9,8) ou a timolftaleína (valores carbonatadas de cor azulada para pH entre 9,3 a 10,5), tornando a fenolftaleína mais precisa para estruturas muito agressiva a esse agente corrosivo (SILVA FILHO, 1994). O Autor (1994) referencia que a colocação na região onde ocorreu a retração do concreto em função do CO₂ que ingressou no material com o hidróxido de cálcio, gera o carbonato de sódio, diminuindo a quantidade de hidroxila hidrolisável.

A camada passivadora que envolve o aço no interior do concreto e mantida elevada em

virtude do seu elevado pH do concreto entre 12,5 a 13,5 na solução dos poros do concreto (SANTOS, 2015). Por conta disso, o Autor (2015) menciona, para que ocorra a corrosão é necessário que a camada passivadora seja destruída (despassivação). Além disso, afirma que os íons cloretos e a carbonatação são os principais agentes agressivos que provoca a despassivação do aço na estrutura, iniciando o processo corrosivo da armadura. Por fim, destaca que a corrosão que é considerada eletrolítica, que ocorre em meio aquoso, necessita de um eletrólito, uma diferença de potencial, oxigênio e agentes agressivos, afetando consideravelmente a durabilidade e a vida útil da vida útil da estrutura.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é o aglomerante hidráulico obtido pela queima a temperaturas elevadas (próximas de 1500°C) de uma mistura adequada de calcário e argila a qual, após o processo de queima, transforma-se em um material sinterizado e granulado denominando “clínquer portland”, antes de qualquer coisa, o cimento Portland pode se constituir unicamente de uma mistura de clínquer finamente moído e de uma substância reguladora do tempo de “pega” ou endurecimento inicial do produto (normalmente sulfato de cálcio), caracterizando o que se convencionou denominar “cimento Portland comum” (ZAMPIERI, 1993).

O cimento Portland caracteriza por ser o componente mais nobre do concreto, a mistura desse cimento com a água gera uma pasta que envolve os agregados sendo responsável pelas propriedades ligantes. Segundo a Norma Brasileira Técnicas (NBR) podendo ser encontrados diversos tipos de cimento Portland, sendo que cada composição apresenta características específicas, a observação destas propriedades na escolha do

cimento aliados as especificidades da obra favorece a qualidade do concreto (JÚNIOR, 2015).

Em consequência da preocupação com a agressividade do ambiente, diversos tipos de cimento Portland, aditivos e adições, forem observaram para resistir a todos esses agentes, por conta disso, Medeiros, Andrade e Helene (2011) observaram que para amenizar aos agentes da:

- Lixiviação: Cimentos do tipo CP III e CP IV
- Reações álcali-agregado: Cimentos pozolânicos tipo CP IV
- Carbonatação: Cimentos tipo CP I e CP V sem adições.
- Cloretos: Cimento com adições tipo CP III e CP IV com adição extra de sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz.

2.2 PASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS

O cobrimento no concreto influencia diretamente na camada passivadora, dificultando o avanço dos agentes do CO₂ em obras de acordo com a sua localização da execução, influenciando na proteção da armadura e dificultando o avanço da carbonatação, consequentemente o processo corrosivo. (POSSAN, 2004)

A película passivadora do concreto é adquirida pela proteção da camada de cobrimento do concreto, no qual, protege contra os agentes físicos e químicos, através da alcalinidade do cobrimento, na qual, essa camada é perdida, por causa da alteração dessa alcalinidade e da diminuição do pH na ordem de 8,3 - 9 (GOMES; SALES, 2004).

A presença dessa camada que recobre o aço é provocado pela presença de óxido e hidróxido, que protege o aço contra a corrosão em razão da diminuição do pH e do potencial eletroquímico, onde essa camada é mantida por ação do seu alto valor de alcalinidade, o qual, é obtido com a formação da portlandita[Ca(OH)₂] no processo de

hidratação do cimento, mas outros álcalis presentes na pasta, contribuem para essa condição (CARMONA, 2005).

2.3 DESPASSIVAÇÃO POR CARBONATAÇÃO

A despassivação da armadura é provocada por: água suficiente no interior do concreto, diferença de potencial elétrico entre as regiões da armadura, bem como a presença de oxigênio para as reações de corrosão (GONÇALVES, 2015).

Os agentes químicos que atinge o concreto, começa através dos efeitos físicos (que provoca a diminuição da resistência, fissuração e lascamento, aumento da porosidade e permeabilidade), fazendo com que os agentes agressivos no ambiente e os constituintes da pasta de cimento penetre nas suas fissuras e porosidade provocando a diminuição do seu pH, e ao atingir a armadura inicia o processo corrosivo, mostrando através disso que um processo pode estimular o aparecimento do outro (MEHTA, MONTEIRO, 2014).

A agressividade do ambiente é uma das principais ações para o projeto/concepção de uma estrutura de concreto no qual o cobrimento das barras de aço, forma uma barreira física e química, responsável pela diminuição da despassivação das armaduras.

A corrosão é provocada por processos eletroquímicos que ocorre em meio aquoso, e são provocadas pela diminuição do potencial hidrogeniônico (pH), oxigênio e agentes agressivos, afetando diretamente a durabilidade, reduzindo sua vida útil (SANTOS, 2015).

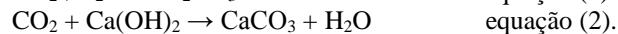
No item 6.3.3.1 da NBR 6118/2014 sita a despassivação sendo a ação do gás carbônico da atmosfera sobre o aço da armadura, do qual ainda afirma que medidas preventivas como cobrimento adequado e controle de fissuração são as medidas preventivas na ação desse agente, principalmente se estiver um concreto de alta porosidade.

2.4 CARBONATAÇÃO

O processo de carbonatação se da pela reação do cimento hidratado e o CO₂, provocando a redução do pH ocasionado pela penetração desse gás nos seus poros, e ao atingir a armadura, provocando um processo corrosivo (CARMONA, 2005).

A redução do pH para valores inferiores a 9, provocado pela dissolvente do CO₂ no ar, penetra os poros e fissuras do concreto sobre o cimento hidratado até atingir o aço, provocando a corrosão, dando-se a esse fenômeno o nome de carbonatação (SOUZA; RIPPER, 1998).

A carbonatação é a penetração do gás carbônico (CO₂) através dos poros do concreto, reagindo com o hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂] formando o carbonato de cálcio (CaCO₃) e água (H₂O). (ANDRADE, 2001) Representado pela sequencia a seguir:



equação (3).

Durante o processo de cimento hidratado seu volume apesenta certas características: 20 a 25% de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂); 50 a 60% de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). (SILVA, 2007)

Peter et al. (2008), constatou que não é apenas o Ca(OH)₂ junto com o CO₂ que provoca a carbonatação, mais sim todos os compostos provocado pela hidratação da pasta de cimento como o C-S-H (silicato de cálcio hidratado), sulfato tri-hidratado (etringita), monossulfato hidratado, C₃S (silicato tricálcio) e C₂S (silicato dicálcio), ainda ele afirma que o Ca(OH)₂ reage três mais rápido do que o C-S-H, vinte vezes mais rápido do que o C₂S e cinquenta vezes mais rápido que o C₃S, fazendo com que o Ca(OH)₂ seja o principal causador entre os agentes da microestrutura do cimento.

O concreto carbonatado apresentará uma maior resistência e melhor impermeabilização à entrada de agentes agressivos que os concretos não carbonatados (HELENE, 1993). O autor ainda cita que se durante a execução o

cobrimento do concreto for o dobro, resultará um aumento de 400% da vida útil da estrutura. O processo da carbonatação está representado na figura 1:

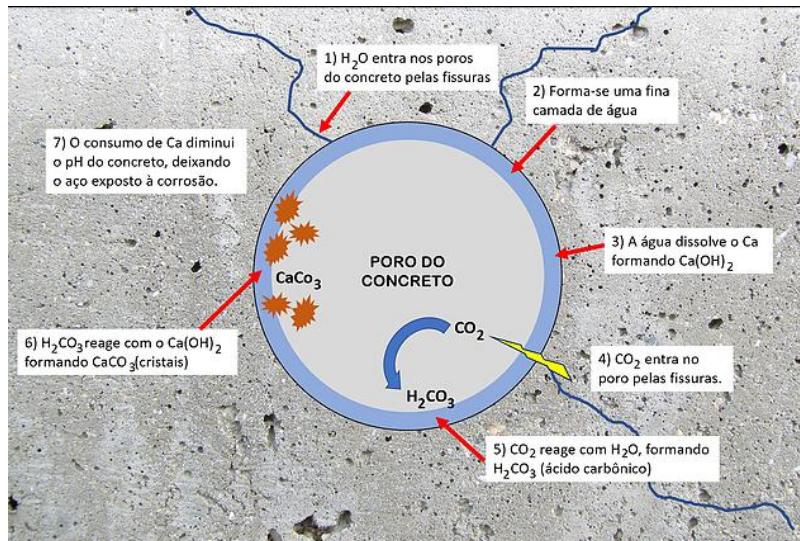


Figura 1: Processo no qual ocorre a carbonatação do concreto

Fonte: Disponível em: <www.arakiengenharia.com.br> (2017)

2.5 VELOCIDADE E FATORES DA CARBONATAÇÃO

Os poros e o pH do concreto são os principais influenciadores na presença da carbonatação, do qual seus elementos como a adição minerais, a relação água/aglomerante, o processo e o tempo de cura, dosagem, porosidade, resistência à compressão, idade, grau de hidratação, agregado e aglomerantes, temperatura, umidade relativa, concentração de CO₂ e tempo de exposição (FERREIRA, 2013).

A grande quantidade de gases ácidos presentes nos grandes centros urbanos e das

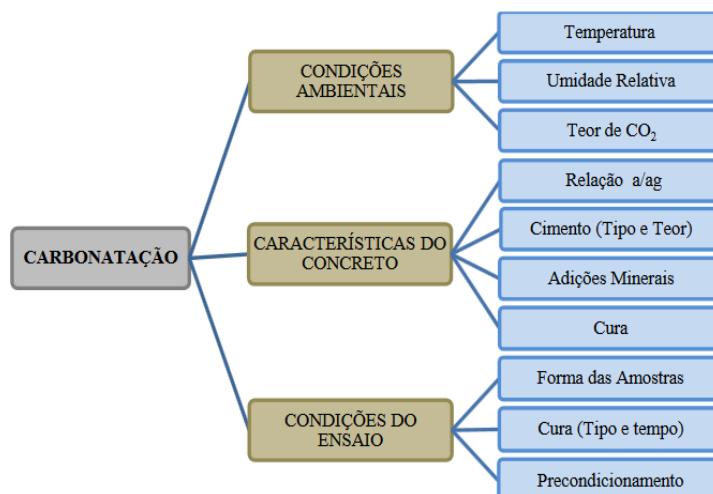
indústrias, provoca a diminuição da alcalinidade do concreto, provocando o aumento da velocidade e profundidade de carbonatação. (POLGGIALI, 2009)

Para uma compreensão melhor dos fatores que influenciam a velocidade da carbonatação será mostrando um quadro dos fatores e as características, além de um organograma dos maiores causadores desse elemento corrosivo, e dar um destaque as condições ambientais (Temperatura, Umidade e Teor de CO₂), que são os fatores que mais acelera a corrosão em comparação aos outros. (PERIM, 2013)

Fatores Condicionantes		Características influenciadas
Condições de exposição	Concentração de CO ₂	Mecanismo físico-químico Velocidade de carbonatação
	Umidade relativa do ar	Grau de saturação dos poros Velocidade de carbonatação
	Temperatura	Velocidade de carbonatação
Características do concreto	Composição química do cimento: - Característica do <i>clinker</i>	Porosidade da pasta carbonatada
	- Teor de adições	Reserva alcalina
	Traço	Porosidade
	Qualidade de execução	
	- Defeitos	Porosidade
	- Cuidados com a cura	Grau de hidratação

Quadro 1 - Fatores que influenciam na velocidade de carbonatação.

Fonte: Kazmierczak (1995) apud Figueiredo (2005)



Organograma 1: Fatores que influencia a carbonatação

Fonte: Perim (2013).

Pelo fato das condições ambientais não poderem ser controlados diferentes das características do concreto e das condições do ensaio, daremos uma abordagem sobre como a Temperatura, Umidade e o teor de CO₂, influencia no processo de corrosão.

- **Umidade relativa do ambiente e saturação dos poros:**

A umidade provocar a carbonatação deverá apresentar valores entre 50% e 85%, já em baixa umidade (abaixo de 50%) não apresentará um valor muito satisfatório do seu avanço, provocado pela falta de água para dissolver o CO₂ (PALLETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2006). Bazzan (2014) diz que a umidade influência na quantidade de água nos poros do concreto, aumentando a difusão do ácido carbônico (CO₂ + H₂O) no avanço pelos poros do concreto. Essas estruturas com

elevado valor de sua umidade apresentarão indícios de corrosão, apresentando manchas de óxido na superfície do concreto, simbolizando a perda de aderência do aço com o concreto, assim como a perda de seção transversal da barra de aço na estrutura (POGGIALI, 2009).

Os poros acarretam diretamente o processo de carbonatação, se os poros estiverem secos, a carbonatação não ocorre, pois o concreto não estará hidratado (FIGUEIREDO e MEIRA, 2013). Por conta disso, os autores (2013) mencionam que se os poros estiverem saturados, provocará a baixa da velocidade da mistura do CO₂ na água, provocando o baixo avanço da carbonatação, e se os poros estiverem parcialmente preenchidos por água, provocando a hidratação do concreto, favorecendo o avanço do CO₂ pelos poros.

• Temperatura:

A temperatura acelera o processo de reações, promovendo a ação na reserva alcalina no interior do concreto, influenciando indiretamente a carbonatação, pois causa o aumento da velocidade das reações, incrementando a quantidade no interior do concreto. (TASCA, 2012)

A variação de temperatura do ar ambiente pode provocar a condensação da água na área externa do concreto provocando assim mudança no teor de umidade do material influenciando diretamente no processo corrosivo (TUUTTI, 1982).

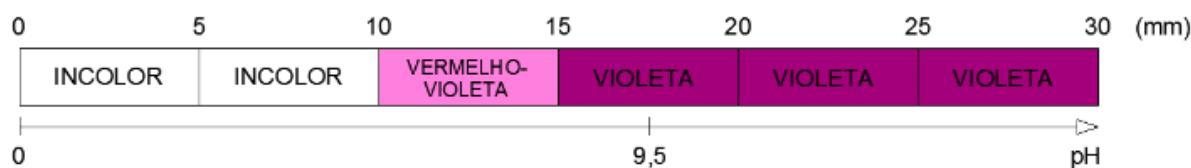


Figura 2 - Escala de cores provocadas pelos testes de fenolftaleína no concreto.

Fonte: Moreira (2016).

Os indicadores do processo de carbonatação são analisados pela fenolftaleína (1g de timolftaleína + 49g de álcool + 50 g de

• Concentração de CO₂:

A entrada do gás carbônico no cobrimento do concreto ocorre por difusão, mas para ocorrer à deterioração da estrutura, ele tem que entrar pelas aberturas dos poros provocando alteração nas próprias condições iniciais do concreto modificando a microestrutura e a composição da solução inicial (HELENE, 1993).

O avanço do CO₂ na estrutura se da pelas fissuras no processo em que a estrutura começa a trabalhar, facilitando a entrada do dióxido de carbono pelos poros do concreto. A abertura de fissura, valores de íons OH⁻ e a quantidade de água influencia diretamente o processo corrosivo causado pela carbonatação podendo provocar à auto cicatrização da fissura (FIGUEIREDO; HELENE, 1994).

2.6 MEDIDAS DE CARBONATAÇÃO

A verificação da profundidade da carbonatação é através de uma solução aquoso-alcoólica de fenolftaleína, aplicada em uma área recém-exposta do concreto, no qual se apresentar uma cor róeo-avermelhada na região não carbonatada (pH entre 10 a 12,5), e na área carbonatada (pH entre 8,3 e 10) permanece incolor (GENTIL, 1996), como mostra a figura 2.

água) ou a timolftaleína (1g de timolftaleína + 99g de água) (GONÇALVES, 2015). Essas substâncias no contato do concreto adquire coloração específica devido a mistura com a

solução alcalina presente no concreto, rica em hidróxido de cálcio, modificando sua cor de acordo com o valor de seu pH (CASCUDO; CARASEK, 2011). Como mostra a figura 3.



Figura 3 - Teste com a fenolftaleína
 Fonte: Autor (2018).

2.7 RETRAÇÃO POR CARBONATAÇÃO

O processo no qual causa a decomposição de cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sob tensão de compressão, provocada pela retração de secagem e pela retirada do CaCO_3 nos lugares efetivos de tensões, é chamado de retração por carbonatação, mostrando também caso a carbonatação provoque a desidratação do C-S-H, também provoca a sua retração (NEVILLE, 2015).

A retração por carbonatação é o processo no qual causa movimentação higroscópica (facilidade de absorção de água influenciada pela umidade, velocidade de

secagem e o tamanho dos poros) que por sua vez também é ocasionada por uma reação química no qual é preenchido por CO_2 e água no interior dos poros. (SOUZA, 2014)

3 ESTUDO DE CASO

O residencial é localizado na Rua Aurélio Guedes Cavalcante 247, no bairro Camboinha, Cabedelo-PB, Km 4 da Br 230 (Como mostra a figura 6). Possui 24 apartamentos, sendo seis pavimentos tipo, uma cobertura/área de lazer. Uma área total de 648 m², sendo 388 m² construídos no térreo/garagem.

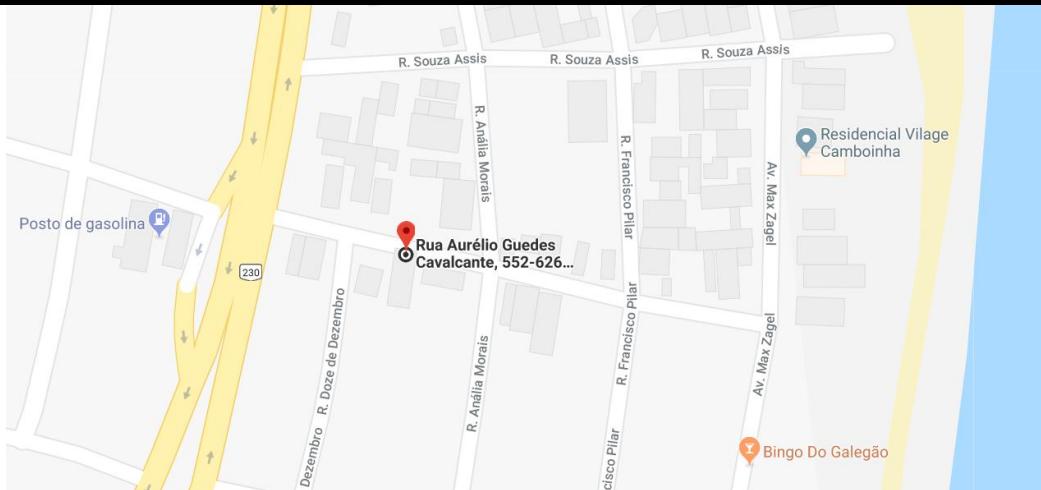


Figura 4 - Localização do residencial
Fonte: Google Maps (2018).

A Planta baixa do térreo foi dividido em 12 pilares, 11 vigamentos e 9 lajes, como forma de localizar e facilitar a demarcação

das áreas de corrosão, uma vez que o projeto estrutural e o projeto de forma não esteve disponível, foi então elaborado uma planta de forma, como pode ser visto a seguir:

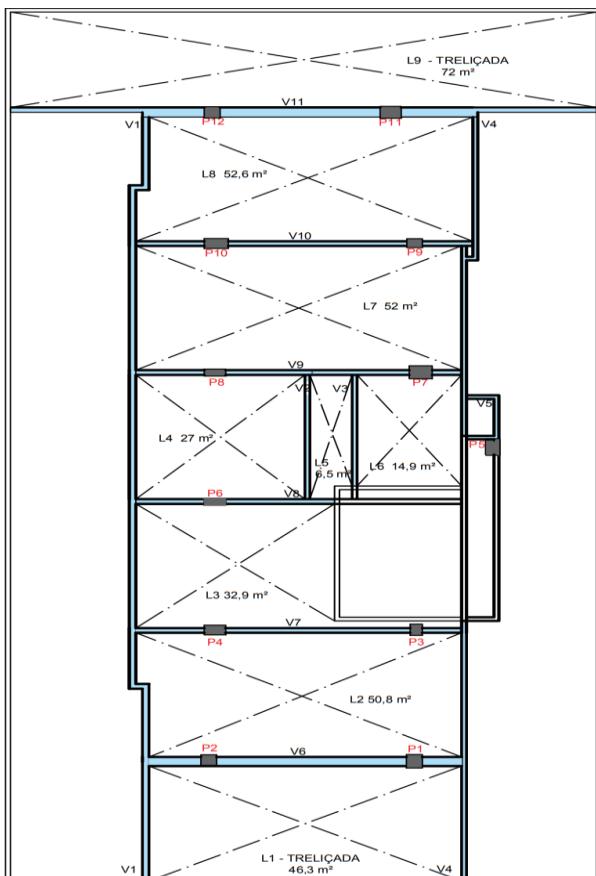


Figura 5 - Planta de forma do condomínio
Fonte: Autor (2018).

A classificação das áreas de acordo com o grau de corrosão foram classificados os locais de acordo com a seu grau de deterioração: crítico, regular ou mínimo. O estado crítico é aquele que compromete diretamente a estrutura e coloca em risco a segurança das pessoas. O estado regular compromete parcialmente o desempenho da estrutura, com funcionalidade estrutural a níveis aceitáveis. O estado mínimo foi delimitado a áreas que tem potencial de se tornarem áreas razoáveis, por meio de teste amostral das estruturas que não apresentaram visivelmente patologias (rachaduras, fissuras, corrosão). Como pode se ver nas figuras a seguir:



Figura 6 - Viga “a” e viga “b” em estado crítico de corrosão
 Fonte: Autor (2018).



Figura 7 - Laje “a” em estado regular. Laje “b” em estado crítico
 Fonte: Autor (2018).

O Laudo técnico foi criado para ser analisado os agentes provocantes e a demarcação da áreas corrosivas que será

recuperada no qual passará pelo seguinte procedimento:

- Reconhecimento do local;

- Medição da área total do edifício;
- Medição da área total construída do térreo/garagem;
- Construção da planta estrutural do térreo/garagem;
- Identificação e demarcação das lajes, vigas e pilares;
- Ruptura parcial do forro de gesso do térreo/garagem;
- Deslocamento cerâmico dos pilares com foco de corrosão;
- Medição dos focos de corrosão (lajes, vigas e pilares);
- Construção de uma planta com os respetivos focos de corrosão;
- Teste de diferença de potencial, até 2 metros do foco de corrosão;
- Medição dos focos de corrosão a partir do teste de diferença de potencial;
- Estimativa de toda área a ser recuperada, a partir dos testes amostrais;

A Caracterização do material foi analisado através de testemunho, resistência à compressão de testemunho, porosidade,

esclerometria, determinação da espessura de cobrimento e bitola da armadura (método eletromagnético).

O agente agressivo detectado na obra foi a presença de cloretos pelo método colorimétrico com nitrato de prata; profundidade de carbonatação pela aspersão da fenolftaleína.

A Caracterização do processo corrosivo foi potencial de corrosão através da semicélula de cobre/sulfato de cobre.

Depois do processo de reconhecimento e medições das áreas corrosivas, foram utilizados testes de medidores de corrosão: a fenolftaleína como foi visto na figura 3 e a diferença de potencial, como pode ser visto a seguir:



Figura 8 - Vigas “a” e “b” em estado de área de estado mínimo de corrosão, demarcada após teste de diferença de potencial nas áreas próximas aos focos de corrosão crítica.

Fonte: Autor (2018).

As áreas dos graus de corrosões foram através dos testes com a fenolftaleína (para verificação da profundidade de carbonatação e sua determinação) e testes de medição de diferença de potencial (que verifica a

probabilidade de haver corrosão nas armaduras).

Os testes com a fenolftaleína foi realizada em armaduras que não apresentava

sinais visíveis de corrosão, para comprovar a existencia de focos de corrosão.

As demarcações com giz nas lajes foram feitas para mostrar as áreas, onde deveriam retirar o concreto para fazer os testes e posteriormente executar a recuperação da estrutura.

3 FORMAS DE MITIGAÇÃO E RECUPERAÇÃO POR CARBONATAÇÃO

Para a corrosão não ocorrer o concreto utilizado na estrutura deverá passar por alguns procedimentos: Ser compactado, controlar a fissuração, tamanho da estrutura, espessura de seus cobrimentos, levando em consideração as cargas e a agressividade do ambiente (SOUZA; RIPPER, 1998).

Os aspectos da ação da carbonatação, no qual afirma os seguintes casos (POSSAN, 2004):

- A relação a/ag (água/aglomerante) de 0,8 com adição de sílica ativa provoca o aumento da sua velocidade.
- A adição da sílica ativa com apenas 5% de CO₂ provoca uma aceleração maior do que os coeficientes numéricos que leva em consideração a raiz quadrada do tempo, por apresentar resultados satisfatórios em períodos inferiores.
- Para relação de a/ag inferior a 0,45 a adição da sílica ativa não exerce influência no avanço da carbonatação.
- Umidade inferior a 50% não apresentará valores satisfatório, entretanto se apresentar valor entre 70% apresentará um avanço considerável.

O seu novo recobrimento durante o processo de restauração apesenta três funções (JÚNIOR, 2008):

- Proteger o avanço da umidade, oxigênio e agentes agressivos até a camada de aço;
- Recompor a área da seção da estrutura;
- Garantir um alto pH assim garantindo a passivação da armadura.

Ribeiro et al. (2014) apud Marques (2015), os principais influenciadores para a ocorrência da corrosão são:

- Não respeitar o cobrimento mínimo.
- Baixa resistência contra os agentes externos;
- Compactação mal executada;
- Presença interna de agentes contaminantes;
- Pouca quantidade de cimento
- Alta relação água/cimento

O procedimento adequado de recuperação da armadura de uma estrutura que apresenta uma manifestação corrosiva é (MARQUES, 2015):

- Marcação da área que será recuperada;
- Retirada do concreto contaminado;
- Limpeza da área demarcada
- Preparação da camada de aderência
- Revestir com anticorrosivo a armadura
- Restauração da área retirada do concreto
- Proteção da área externa da estrutura de concreto.

Depois dos estudos de recuperação, foi então retirado o concreto em locais de corrosão avançado; Lixamento com esmerilhadeira nas ferragens para retirar a corrosão; Pintura com anticorrosivo; Utilização do cobrimento de 3 cm (exigido por norma). Como mostra a figura a seguir:



Figura 9: a) Estado de conservação do pilar encontrado na obra; b) Processo de recuperação de outro pilar, depois de retirado o concreto carbonatado, retirado à corrosão da armadura, passado pintura com anticorrosivo, esperando apenas o processo de recobrimento da armadura.

Fonte: Autor (2018).

etapas da recuperação estrutural, garantindo essa estrutura uma vida útil maior, e um tempo de reparo em períodos mais longos.

O processo construtivo dos elementos estruturais, considerando as exigências de normas, tecnologia do concreto e os fatores das condições ambientais onde a construção será erguida possibilita um concreto cada vez menos poroso, e com isso dificulta a entrada do CO₂, diminuindo a reação dos elementos que causa a carbonatação.

A medição do teor do pH do concreto através da fenolftaleína, comprovou a diminuição do pH a ocorrência da carbonatação nas estruturas, depois foi feito um estudo da melhor forma de recuperação das armaduras do concreto e executado na obra.

Sugestão de trabalhos futuros: Durante a concretagem de uma obra guardar uns seis corpos de prova do concreto utilizado, observando qual foi o traço (cimento:areia:brita) e a relação

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho foram realizados através de revisão de literatura e pesquisa de campo, para uma melhor compreensão sobre os fatores corrosivos causados pela carbonatação, os processos para a identificação e também os meios de recuperação da estrutura, afim de que a estrutura resista durante a sua vida útil projetada, sem ocorrer à corrosão do aço nas peças de concreto armado.

O estudo de caso e os testes realizados mostraram-se eficientes no que foi proposto o tema, onde foram obtidos resultados satisfatórios sobre a identificação desse agente patológico, através dos testes, e as

água/cimento, mantendo em ambientes a céu aberto para ficar o mais perto do real possível e depois de 28 dias, conferir visualmente a porosidade do corpo de prova, fazer testes com a fenolftaleína e romper esses corpos de prova para encontrar a sua resistência; Criar um traço resistente as condições ambientais através de estudos literários e de testes laboratoriais, e que apresente resistência mínima exigida para as peças estruturas e que apresente uma boa trabalhabilidade; Levantamento dos materiais que mais contribuem para a carbonatação e através disso realizar ensaios levando em consideração as características do concreto: Relação água/agregado; Cimento (Tipo e Teor); Adições minerais e Cura, e com isso apresentar resultados mais satisfatórios e com isso criar traços cada vez mais resistente de acordo com a agressividade do ambiente que a obra vai estar localizada.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 6118/2014: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Acesso em: 6 maio 2019.

ANDRADE, Jairo José de Oliveira. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armadura: iniciação por cloretos.** 2001. 257f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2613/000323380.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 23 maio 2019.

ANDRADE, Jairo José de Oliveira. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco.** 1997. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1997

Disponível em:
<<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/122441/000215709.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 8 maio 2019.

ARAUJO, Renata. **Avaliação da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto armado de uma refinaria de petróleo com vida útil maior de 40 anos.** SPPC – SIMPÓSIO PARANAENSE DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 2017

Disponível em:
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwij6peDp6_jAhV7ILkGHaL1A5MQFjAAegQIABAC&url=http%3A%2F%2Fdoi.editoracubo.com.br%2F10.4322%2F2SPPC.2017.022&usg=AOvVaw0DwOKLV-wzCBpFPppaXQq> Acesso em: 6 maio 2019.

BAZZAN, Giselle Christine Graça. **Análise do cobrimento e carbonatação em obras de arte especiais no estado de São Paulo.** 2014. 150f. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo. 2014. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjw2OC0p6_jAhWzDbkGHcBmDGAQFjAAegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fwww.phd.eng.br%2Fwp-content%2Fuploads%2F2015%2F01%2FBazan-G.-C.-G-Monografia-Gest%25C3%25A3o-de-proj.-de-sistemas-estruturais.pdf&usg=AOvVaw10jpkSvGhOZwZ7P_Nnbslr> Acesso em: 11 maio 2019.

CARMONA, Thomas Garcia. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação.** 2005. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo. 2005. Disponível em:

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjniK_Tp6_jAhVbILkGHYaqA5AQFjAAegQIABAC&url=https%3A%2F%2Fwww.teses.usp.br%2Fteses%2Fdisponiveis%2F3%2F3146%2Ftde-27072005-163131%2Fpublico%2FMestrado_Thomas.pdf&usg=AOvVaw0LhDgL2kb844xtBtUFuKy1> Acesso em: 8 maio 2019.

CASCUDO, Oswaldo; CARASEK, Helena. **Concreto: ciência e tecnologia.** 1. ed., IBRACON. 2011. 883f.

CLÍMACO, João Carlos Teatini de Souza. **Estruturas de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação.** 389f. Brasília: Editora UnB, 2008.

CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z., HELENE, P. **Corrosão em estruturas de**

concreto. ed. 1. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil. 2013. 244f.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; ANDRADE, Jairo José de Oliveira; HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Concreto: ciência e tecnologia.** São Paulo. v. 1 IBRACON. 2011. 415f.

SOUZA, Rui Barbosa de. **Estudo da retração em fibrocimento reforçado com fibra polimérica.** 2014. 244f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo. 2014.

Disponível em:

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiOlteoqK_jAhXbFLkGHY2NAwUQFjAAegQIAxAC&url=http%3A%2F%2Fwww.teses.usp.br%2Fteses%2Fdisponiveis%2F3%2F3146%2Ftde-22102014-095743%2Fpublico%2Ftese_RUI.pdf&usg=A0vVaw3cNh5P6kVXtod6gJvXgc3k>

Acesso em: 23 maio 2019.

SANTOS, Aleílson Vilas-Bôas dos. Corrosão de armadura em estrutura de concreto armado devido a carbonatação. **Revista ESPECIALIZE,** Goiânia, v. 1, ed. 10, 2015.

Disponível em:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj-0v6otK_jAhUTILkGHfbkCSsQFjAAegQIAAAC&url=https%3A%2F%2Fwww.ipog.edu.br%2Fdownload-arquivo-site.sp%3Farquivo%3Daleilson-vilas-boas-dos-santos-101713613.pdf&usg=A0vVaw1Z3urzIyjY0m38TEHJuPaW

Acesso em: 27 maio 2019.

FERREIRA, Murillo Batista. **Estudo da carbonatação natural de concreto com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição.** 2013. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás. 2013.

Disponível em:

<[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjc_tWsqa_jAhW0LLkGHQeUATsQFjABegQIARAC&url=https%3A%2F%2Frepositorio.bc.ufg.br%2Ftede%2Fbitstream%2Ftede%2F3448%2F5%2FDisserta%25C3%25A7%25C3%25A3o%2520-%2520Murillo%2520Batista%2520Ferreira%2520-%2520-%25202013.pdf&usg=A0vVaw3FNmxTmD4p5hfX4T7zvl6_>](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjc_tWsqa_jAhW0LLkGHQeUATsQFjABegQIARAC&url=https%3A%2F%2Frepositorio.bc.ufg.br%2Ftede%2Fbitstream%2Ftede%2F3448%2F5%2FDisserta%25C3%25A7%25C3%25A3o%2520-%2520Murillo%2520Batista%2520Ferreira%2520-%25202013.pdf&usg=A0vVaw3FNmxTmD4p5hfX4T7zvl6_>)

Acesso em: 14 maio 2019.

FIGUEIREDO, Enio Pazini; HELENE, Paulo Roberto do Lago. Assim caminha a corrosão. **Revista TÉCHNE.** São Paulo, v. 2, p. 33. 1994.

FIGUEIREDO, Enio Pazini; MEIRA, Gibson. **Boletim Técnico 6:** corrosão das armaduras das estruturas de concreto. Alconpat, 2013.

GENTIL, Vicente. **Corrosão.** 3. ed. Rio de Janeiro: Afiliada, 1996. 346 p.

GOMES N. A.; SALES A. **Avaliação da carbonatação do concreto em obras interrompidas na cidade de Ribeirão Preto.** I conferência latino-americana de construção sustentável e X encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. São Paulo, 2004. ISBN 85-89478-08-4.

GONÇALVES, Eduardo Albuquerque Buys. **Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações.** 2015. 150f. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2015. Disponível em:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi8z9CAr6_jAhWLJLkGHWUQBz8QFjAAegQIAxAC&url=http%3A%2F%2Fmonografias.poli.ufrj.br%2Fmonografias%2Fmonopolis10014879.pdf&usg=A0vVa

w0vs-BcipzcTnFE81RRU6yr> Acesso em: 23 maio 2019.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** Universidade de São Paulo. 1993. 231f. Tese (Doutorado em Engenharia de construção civil). São Paulo. 1993

Disponível em: <<https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/TD1.pdf>> Acesso em: 8 maio 2019.

JÚNIOR, Enio Ribeiro. Propriedades dos materiais constituintes do concreto. **Revista Especialize.** 2015. Goiânia, v. 1, ed. 10, 2015.

MARQUES, Vinícius Silveira. **Recuperação de estruturas submetidas à corrosão de armaduras:** definição das variáveis que interferem no custo. 2015. 92f. Projeto de Pesquisa (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2015. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwix_Ljxr6_jAhWqJ7kGHVu1DRcQFjAAegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.lume.ufrgs.br%2Fbitstream%2Fhandle%2F10183%2F138345%2F000989636.pdf&usg=AOvVaw1i2hkLhqLpaBbjk6kOT2ym> Acesso em: 3 junho 2019.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. IBRACON, 2014. p. 751.

NEVILLE, Adam M. Livro: **Propriedades do Concreto.** 5. ed. São Paulo: Bookman, 2015.

PERIM, José Roberto. **Influência do metacaulim na durabilidade de concretos usuais de mercado sujeitos à carbonatação acelerada.** 2013. 216f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2013. Disponível em: <[file:///E:/Downloads/Dissertação%20-%20José%20Roberto%20Perim%20-202013\(1\).pdf](file:///E:/Downloads/Dissertação%20-%20José%20Roberto%20Perim%20-202013(1).pdf)> Acesso em: 27 maio 2019.

PETER, M. A. Competition of Several Carbonation Reactions in Concrete: a parametric study. **Cement and Concrete Research,** v. 38, ed. 12., 2008. p. 1385.

POGGIALI, Flávia Spitale Jacques. **Durabilidade de estruturas de concreto em usinas siderúrgicas.** 2009. 81f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Minas Gerais. 2009. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwir06iasK_jAhXcLLkGHYJADtIQFjAAegQIARAC&url=http%3A%2F%2Fwww.cecc.eng.ufmg.br%2Ftrabalhos%2Fpg1%2FDurabilidade%2520de%2520Estruturas%2520de%2520Concreto.pdf&usg=AOvVaw0pudGhJtB6VcDiiLoqG8WJ> Acesso em: 26 maio 2019.

PORTE, Thiago Bomjardim; FERNANDES, Danielle Stefane Gualberto. **Curso básico de concreto armado.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015. p. 204.

POSSAN, Edna. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado.** 2004. 153f. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2004. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8524/000578523.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 12 maio 2019.

POSSAN, Edna. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano.** 2010. 263f. Tese (Doutor em Engenharia) - Universidade do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2010. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183>>

/28923/000773564.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 3 jun. 2019.

SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto da.
Durabilidade do concreto a ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica. 1994. 143f. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 1994. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/134138/000189122.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 30 maio 2019.

SILVA, Valdirene Maria. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida.** 2007. 281f. Tese (Doutor em Engenharia) – Universidade de São Paulo. São Carlos. 2007
 Disponível em:
 <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiYhfr1sa_jAhVuDrkGHZ4ED3AQFjAAegQIAxAC&url=http%3A%2F%2Fwww.set.eesc.usp.br%2Fstatic%2Fmedia%2Fproducao%2F2007DO_ValdireneMariaSilva.pdf&usg=AOvVaw0V16YJ-qwT28gHSjC3xAup> Acesso em: 8 maio 2019.

SOUZA, V.C.M; RIPPER, Thomas.
Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: Pini, 1998

TASCA, Maisson. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas:** monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura. 2012. 178f. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2012
 Disponível em:
 <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7810/TASCA%2c%20MAISSON.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 12 maio 2019.

TUUTTI, Kyösti. **Corrosion of steel in concrete:** swedish cement and concrete. 1982. 468 f. Tese (Doutor em Engenharia) - Research Institute, Stockholm. 1982. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiq9fAsq_jAhU_EbkGHTEcDY0QFjAAegQIARAC&url=https%3A%2F%2Flucris.lub.lu.se%2Fws%2Ffiles%2F4709458%2F3173290.pdf&usg=AOvVaw0kI3YW_6Jnh-A9NUIKrr4q> Acesso em: 27 maio 2019.

ZAMPIERI, Valdir Aparecido. **Cimento portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas:** fabricação, hidratação e desempenho mecânico. 1993. 233f. Tese (Doutor em Engenharia) - Universidade de São Paulo. São Paulo. 1993. Disponível em : <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-25062015-102757/publico/Zampieri_Doutorado.pdf> Acesso em: 23 maio 2019.