



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

JAIRO DUTRA MOREIRA

**VERIFICAÇÃO DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO EM ESTRUTURAS
DE CONCRETO – ESTUDO DE CASO**

JOÃO PESSOA
2016

JAIRO DUTRA MOREIRA

**VERIFICAÇÃO DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO EM ESTRUTURAS
DE CONCRETO – ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC),
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Civil como requisito parcial, para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Orientador: Professor Dr. Paulo Germano
Toscano Moura

JOÃO PESSOA

2016

M835v Moreira, Jairo Dutra

Verificação de Profundidade de Carbonatação em Estruturas de Concreto - Estudo de Caso / Jairo Dutra Moreira. / - João Pessoa, 2016.

39f. il.:

Orientador: Profº Drº Paulo Germano Toscano Moura

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil)
CGEC./ Centro de Tecnologia / Campos I / Universidade Federal da Paraíba

1. Patologias 2. Carbonatação 3. Concreto Armado I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2ªed. 624.92 (043)

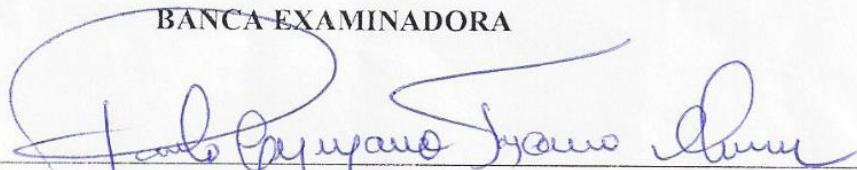
JAIRO DUTRA MOREIRA

VERIFICAÇÃO DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO EM ESTRUTURAS
DE CONCRETO – ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC),
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Civil como requisito parcial, para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Aprovado em: 16 / 06 / 2016.

BANCA EXAMINADORA



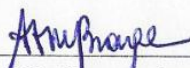
Prof. Dr. Paulo Germano Toscano Moura (Orientador)
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB



Prof. Dr. Enildo Tales Ferreira (Membro)
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB



Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo (Membro)
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB



Profª. Dra. Ana Claudia Fernandes Medeiros de Braga
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

**Aos meus pais, José Antônio Moreira da
Silva e Jucilene Dutra Almeida Moreira.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me guiado sempre nos caminhos certos e por ter me concedido a vitória em todas as batalhas enfrentadas.

Agradeço aos meus pais, José Antônio Moreira da Silva e Jucilene Dutra Almeida Moreira, por serem meus exemplos de inspiração e por estarem sempre me apoiando em todos os momentos. Infinita é a gratidão que tenho por vocês. Obrigado por tudo.

Agradeço ao meu avô, Gustavo Moreira da Silva (in memoriam), pelo exemplo que o senhor sempre foi pra mim, um homem íntegro e de muita firmeza em suas palavras.

Ao meu Orientador Dr. Paulo Germano Toscano Moura pela disponibilidade e por todos os conhecimentos passados.

Aos meus amigos de turma, em especial a Daniel Félix Soares, Paulo André Nunes Furtado e Welky Kléfson Ferreira de Brito, que caminharam comigo sempre me ajudando.

À Francinaldo de Brito Silva e Felipe Augusto da Silva Barbosa pela amizade durante o curso e pelo apoio durante o trabalho.

À Fabiana, pelo apoio e compreensão durante todo o tempo em que estamos juntos.

À minha querida irmã amiga Bruna Dutra Moreira, pelo carinho e apoio em todos os momentos.

Aos funcionários e professores da Universidade Federal da Paraíba.

E a todos os que contribuíram de forma direta ou indiretamente na concretização desse sonho.

RESUMO

O trabalho consiste na avaliação de profundidade de carbonatação em estruturas de concreto armado. O objetivo principal foi a determinação da profundidade de carbonatação na laje de cobertura em concreto armado de um bloco de salas de aula do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. A análise se deu através de amostras colhidas e ensaiadas com a fenolftaleína (indicador de pH) para se saber a profundidade de carbonatação. A profundidade média encontrada foi de 15,28 mm com intervalo de variação entre 11,95 e 18,61 mm. A profundidade de carbonatação encontrada mostra que a laje está com sua armadura seriamente comprometida. Tendo em vista os atuais conhecimentos de engenharia civil na área de materiais, pode-se de posse desses resultados, traçar metodologias eficazes e duradouras para a execução futura de obras de restauração.

Palavras-chave: Patologias. Carbonatação. Concreto Armado.

ABSTRACT

This work consists of the evaluation of the carbonation depth in reinforced concrete slab. Its main goal was to determine the carbonation depth of a reinforced concrete slab located on the roof of a classroom building at the Technology Center of the Federal University of Paraíba. This analysis was done by collecting and testing samples with phenolphthalein (pH Indicator) in order to determine the carbonation depth. The medium depth calculated was 15,28 mm with a variation range from 11,95 to 18,61 mm. The carbonation depth determined shows that the slab is with its reinforcement seriously compromised. Therefore, with the current civil engineering knowledge in the field of materials, it's possible to seek and apply efficient and lasting methodologies in the rehabilitation of the constructions.

KEY WORDS: Pathologies, Carbonation, Reinforced Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Guarda-rodas rompido por veículo. (b) Laje de viaduto danificada por choque de caminhão.	16
Figura 2 – Processo de corrosão bacteriana.....	17
Figura 3 – Eflorescência em laje.	18
Figura 4 – Estrutura de canal atacada por sulfatos (certamente água com alto teor de sulfatos).	19
Figura 5 – Ataque por cloretos.	20
Figura 6 – Fundação atacada por RAA.	21
Figura 7 – Representação esquemática da carbonatação do concreto: a) poros totalmente secos; b) poros saturados com água; e c) poros parcialmente preenchidos com água (concreto com umidade relativa normal do ambiente).	23
Figura 8 – Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente.....	23
Figura 9 – Bloco de salas CTD – UFPB.....	25
Figura 10 – Planta de localização dos furos no bloco e disposição dos mesmos (medidas em metro).	26
Figura 11 – Perfuração e coleta da amostra com recipiente.....	27
Figura 12 - Profundidade à qual cada amostra representa.....	27
Figura 13 – Escala de cores na determinação da profundidade de carbonatação. No caso, 17,5 mm.....	28
Figura 14 – Escala de cores “gradual” na determinação da profundidade de carbonatação. No caso, 17,5 mm.....	28
Figura 15 – Distribuição das profundidades (curva Gaussiana).....	31
Figura 16 – Furo 01: profundidade: 12,5 mm	34
Figura 17 – Furo 02: profundidade: 22,5 mm	34
Figura 18 – Furo 03: profundidade: 12,5 mm	34
Figura 19 – Furo 04: profundidade: 7,5 mm	34
Figura 20 – Furo 05: profundidade: 7,5 mm	34
Figura 21 – Furo 06: profundidade: 7,5 mm	34
Figura 22 – Furo 07: profundidade: 22,5 mm	34
Figura 23 – Furo 08: profundidade: 22,5 mm	34
Figura 24 – Furo 09: profundidade: 27,5 mm	35
Figura 25 – Furo 10: profundidade: 7,5 mm	35

Figura 26 – Furo 11: profundidade: 12,5 mm	35
Figura 27 – Furo 12: profundidade: 17,5 mm	35
Figura 28 – Furo 13: profundidade: 22,5 mm	35
Figura 29 – Furo 14: profundidade: 12,5 mm	35
Figura 30 – Furo 15: profundidade: 22,5 mm	35
Figura 31 – Furo 16: profundidade: 7,5 mm	35
Figura 32 – Furo 17: profundidade: 12,5 mm	36
Figura 33 – Furo 18: profundidade: 17,5 mm	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de degradação e o efeito sobre o desempenho.....	15
Tabela 2 – Materiais utilizados.....	29
Tabela 3 – Profundidade de carbonatação dos furos.	31

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1 O CONCRETO ARMADO	13
2.2 PATOLOGIA E SUAS ORIGENS	13
2.3 SINTOMAS.....	14
2.4 CAUSAS	14
2.4.1 CAUSAS MECÂNICAS	16
2.4.2 CAUSAS BIOLÓGICAS	16
2.4.3 CAUSAS FÍSICAS	17
2.4.4 CAUSAS QUÍMICAS.....	17
2.4.4.1 ÁGUA PURA.....	18
2.4.4.2 SULFATOS	19
2.4.4.3 CLORETOS	20
2.4.4.4 ÁLCALI-AGREGADO.....	21
2.4.4.5 CARBONATAÇÃO.....	21
3. METODOLOGIA.....	25
3.1 ESTUDO DE CASO	25
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.2.1 PROCEDIMENTOS DO ESTUDO	25
3.2.2 ESCOLHA DO INDICADOR ALCALINO	28
3.2.3 MATERIAIS UTILIZADOS.....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
5.1 CONCLUSÕES	37
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	37
REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento do mercado da construção civil além de gerar muita demanda por novas moradias, produz um cliente mais informado sobre os seus direitos nos contratos de aquisição de imóveis. Com a recente publicação da Norma NBR 15.575/2013 - Edificações Habitacionais – Desempenho, conhecida no meio técnico apenas por Norma de Desempenho, foram estabelecidos padrões de desempenho e vida útil para os elementos principais de uma construção, trazendo inúmeros benefícios ao consumidor, tais como conforto e segurança em suas habitações, além de atribuir responsabilidades à quem projeta, ao construtor e usuários.

É legítima a reivindicação de um desempenho adequado de um determinado imóvel, uma vez que, ao adquirir o bem espera-se que ele cumpra com seu esperado desempenho por muitas décadas, ou até mesmo por uma vida inteira, a exemplo de muitas construções gregas e romanas que após séculos ainda permanecem erguidas. Visando garantir essa durabilidade das construções, a Norma de Desempenho exige, por exemplo, que as estruturas de concreto apresentem uma Vida Útil de Projeto (VUP) igual ou superior a 50 anos. Diante deste cenário é necessária uma atenção maior aos materiais e suas formas de utilização para que as novas construções não venham a apresentar um desempenho insatisfatório.

Segundo a Norma de Desempenho (NBR 15.575, 2013), “patologia é uma não conformidade que se manifesta no produto em função de falhas no projeto, na fabricação, na instalação, na execução, na montagem, no uso ou na manutenção bem como problemas que não decorram do envelhecimento natural.”

Já VILASBOAS (2004, p. 71), a respeito das patologias do concreto armado, indica que:

A patologia do concreto armado pode estar relacionada à patologia dos seus componentes, ou ser independente dela e ser devida a um mau emprego dos mesmos, dosagem ou execução deficientes, de incorreções na sua aplicação na obra, na cura incipiente dentre outros. Deve-se ter em consideração que todos os defeitos produzidos no concreto irão repercutir em suas resistências mecânicas, em sua estabilidade dimensional e, especialmente, em sua durabilidade.

Como visto, diversas são as motivações do surgimento de patologias em estruturas de concreto armado. Porém, o enfoque de estudo deste trabalho será o fenômeno químico da carbonatação, uma das patologias mais recorrentes nas estruturas em concreto. A carbonatação consiste nas reações químicas entre os componentes do cimento hidratado e o

gás carbônico (CO₂) presente na atmosfera, reduzindo o pH do concreto e propiciando a corrosão do mesmo.

O objetivo principal deste trabalho é medir a profundidade de carbonatação na laje maciça em concreto tipo “plissé” do bloco D do centro de tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. Este estudo faz parte de um conjunto de análises exploratórias sobre a corrosão da laje, para ajudar a determinar o grau de comprometimento da laje.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O CONCRETO ARMADO

“O material mais utilizado em estruturas é o concreto armado, entendendo-se como tal a mistura íntima de cimento, agregados, água, eventualmente aditivos e o aço que vai constituir a fibra ou nervo de que o concreto necessita para ser um material estrutural completo” (CÁNOVAS, 1988, p. 19).

O material mais largamente usado em construção é o concreto. Entretanto, por erros durante o processo de elaboração do material, surgem as patologias levando as estruturas à degradação que, muitas vezes, comprometem a estabilidade da obra, principalmente a sua durabilidade.

2.2 PATOLOGIA E SUAS ORIGENS

Em relação ao diagnóstico das patologias do concreto armado, (LAPA 2008, p. 26) define:

O concreto armado, sendo um material não inerte, está sujeito a alterações, ao longo do tempo, em função de interações entre seus elementos constitutivos (*cimento, areia, brita, água e aço*), entre esses e materiais que lhe são adicionados (*aditivos*), e com agentes externos (*ácidos, bases, sais, gases, vapores, microrganismos e outros*). Muitas vezes, dessas interações resultam anomalias que podem comprometer o desempenho da estrutura, provocar efeitos estéticos indesejáveis, ou causar desconforto psicológico nos usuários.

De início as patologias podem ser geradas a partir de uma concepção inadequada de projeto, principalmente pela não observância às normas da ABNT – NBR 6118:2014.

Em sequência, as patologias podem ser oriundas de deficiências dos próprios materiais componentes, podendo ser evitadas através de um controle tecnológico na fase de fabricação. É preciso conhecer os materiais para que se tenha uma correta utilização. Aliado a bons materiais precisa-se ter excelência na execução, tais como curas bem realizadas, dosagens controladas de acordo com estudos realizados em laboratório, posicionamento correto de armaduras para que se evite bicheiras e conseqüente exposições de armaduras, facilitando o indesejado processo prematuro de corrosão do aço. E por fim, a fase de utilização, que exige manutenções para que se conserve determinada estrutura. Com relação à manutenção, British Standards 3811 (1984) *apud* SOUZA (1998, p. 230), define como sendo

“Manutenção estrutural é a combinação de todas as ações de caráter técnico e/ou administrativo que tenham por fim garantir ou reestabelecer, para uma determinada estrutura, as condições necessárias para que esta desempenhe, capazmente, as funções para as quais foi concebida”.

2.3 SINTOMAS

Os sintomas patológicos apresentados pelas estruturas de concreto geralmente são indesejáveis, caracterizando um aspecto de uma “estrutura doente” ao usuário, que de maneira geral se apresentam sob forma de trincas, manchas amareladas, esbranquiçadas etc.

“Os problemas patológicos, salvo raras exceções, apresentam manifestações externas características, a partir das quais podemos deduzir qual a natureza, a origem e os mecanismos dos fenômenos envolvidos, assim como estimar as prováveis conseqüências” (POLITO, 2006, p. 16).

Ferreira (2000) observa que a alteração das propriedades mecânicas, físicas e químicas do concreto é responsável pela deterioração ou degradação do mesmo, tanto na sua superfície como no seu interior, geralmente devido à desintegração de seus componentes. Apesar de nem sempre os efeitos de deterioração se apresentarem visualmente, há essencialmente três sintomas visuais básicos de degradação do concreto numa estrutura: a fendilhação, o destacamento e a desagregação.

2.4 CAUSAS

As patologias do concreto podem surgir por causas de diferentes naturezas. O clima e a composição dos gases da atmosfera em volta de uma edificação são exemplos de fatores que

devem ser considerados ao se projetar uma estrutura, quando se almeja durabilidade. Tais fatores podem indicar qual o grau de atenção deve-se dar a qualidade do concreto que será fabricado.

Os fatores de degradação ou causas de degradação podem ser classificados em cinco grupos principais: Causas mecânicas, biológicas, químicas, físicas ou eletromagnéticas.

A Tab. 1 mostra um resumo das causas de degradação, juntamente com o processo e a degradação ocasionada.

Tabela 1 – Fatores de degradação e o efeito sobre o desempenho.

Causas de degradação	Processo	Degradação
<i>Mecânicas</i>		
Carregamento estático	Deformação	Deflexão, fendilhação, rotura
Carregamento cíclico	Fadiga, deformação	Deflexão, fendilhação, rotura
Carregamento por impacto	Fadiga	Vibração, deflexão, fendilhação, rotura
<i>Biológicas</i>		
Microrganismos	Produção de ácido	Lixiviação
Bactéria	Produção de ácido	Lixiviação
<i>Químicas</i>		
Água pura	Lixiviação	Desagregação do concreto
Ácido	Lixiviação	Desagregação do concreto
Ácido e gases ácido	Neutralização	Despassivação do aço
Dióxido de carbono	Carbonatação	Despassivação do aço
Cloretos	Penetração, destruição de camada de despassivação	Despassivação do aço
Despassivação do aço +H ₂ O+O ₂	Corrosão	Expansão do aço, perda de ϕ e de aderência
Tensão + cloretos	Corrosão do aço	Rotura dos tendões de pré-esforço
Sulfatos	Pressão dos cristais	Desagregação do concreto
Agregado(sílica) + álcalis	Reação da sílica	Expansão, desagregação
Agregado(carbonato) + álcalis	Reação do carbonato	Expansão, desagregação
<i>Físicas</i>		
Variação de temperatura	Expansão/contração	Deformação restringida
Variação de umidade	Retração e expansão	Deformação restringida
Baixa temperatura + água	Formação de gelo	Destacamento do concreto
Sal descongelante + geada	Transferência de calor	Destacamento do concreto
Gelo (mar)	Abrasão	Destacamento, fendilhação
Trânsito	Abrasão	Desgaste e rotura
Água corrente	Erosão	Danos superficiais
Água turbulenta	Cavitação	Cavidades

Fonte: Adaptado de FERREIRA, 2000, s/p.

2.4.1 CAUSAS MECÂNICAS

As causas mecânicas são solicitações que as estruturas de concreto estão sujeitas, principalmente devido a carregamentos, seja ele estático, cíclico ou por impacto. Podendo ser citados exemplos de estruturas que sofrem com esse tipo de causa, as fundações que recebem esforços através do recalque diferencial, os pilares de garagens, os guarda-rodas etc.

Um dos principais sintomas é o lascamento do concreto e a fissuração, expondo a armadura e conseqüentemente facilitando o processo de corrosão do aço.

Cravação de estacas, abalos sísmicos, força exercida por equipamento sobre a fundação que o sustenta (Ex.: elevador cremalheira) são exemplos de situações que recebem forças através de impacto. A Fig. 1 exemplifica estruturas que constantemente estão sujeitas a impactos.

Figura 1 – (a) Guarda-rodas rompido por veículo. (b) Laje de viaduto danificada por choque de caminhão.



(a)

(b)

Fonte: (a) SANTOS, 2012, p. 11. (b) Disponível em: <http://imguol.com/c/noticias/2014/12/24/24dez2014---um-caminhao-com-excesso-de-altura-ficou-entalado-no-viaduto-bresser-na-radial-leste-em-sao-paulo-sp-na-manha-desta-quarta-feira-24-1419419018968_956x500.jpg>. Acesso em 11/05/2016.

2.4.2 CAUSAS BIOLÓGICAS

O ataque biológico é mais frequente nas infraestruturas de saneamento, onde boa parte das tubulações que transportam as águas residuais são em concreto armado. Ele é ocasionado pela interação dos componentes do concreto com os ácidos que são produzidos da seguinte forma: os microrganismos presentes no esgoto tendem a oxidar o enxofre e os componentes contendo enxofre, que logo são reduzidos em sulfitos e liberados à atmosfera na forma de

H_2S , que ao ser condensado em contato com as paredes da tubulação é transformado pelas bactérias no ácido H_2SO_4 que é altamente agressivo ao concreto.

O ácido reage com os componentes de caráter básico do concreto (hidróxido de cálcio/portlandita/ $Ca(OH)_2$), formando sal de cálcio e água. Os principais sais de cálcio formados nas reações são: carbonato de cálcio, sulfato de cálcio e o cloreto de cálcio, sendo o último mais solúvel em água em relação aos demais, o que facilita seu processo de lixiviação. Observe a reação básica que ocorre na formação do sal e na Fig. 2 o processo de corrosão bacteriana do concreto:

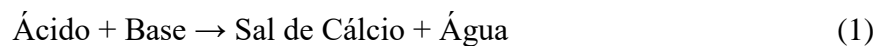
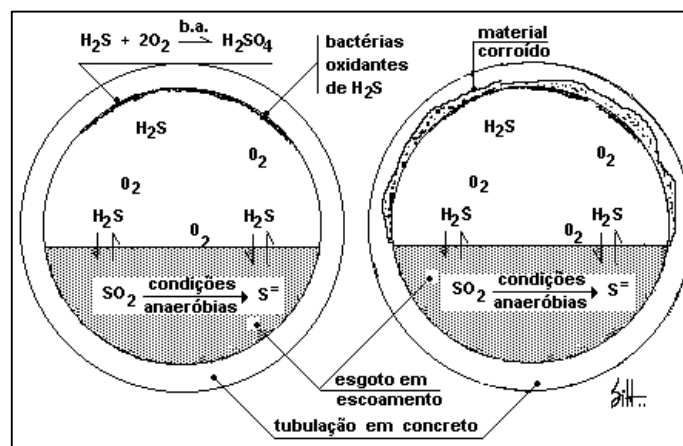


Figura 2 – Processo de corrosão bacteriana



Fonte: Disponível em: <http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/ES02_04.html>. Acesso em: 11 maio 2016.

2.4.3 CAUSAS FÍSICAS

O concreto pode ser atacado fisicamente através de diversos processos, conforme elencados anteriormente na Tab. 1. A variação de temperatura, umidade, e os danos causados pelos movimentos da água são os principais fatores responsáveis pelo ataque físico.

2.4.4 CAUSAS QUÍMICAS

As causas químicas estão diretamente ligadas à porosidade, à composição do cimento utilizado e às condições de cura do concreto. Pois são estes os fatores que melhoram as condições para a ocorrência de reações químicas entre agressores prejudiciais ao concreto. A porosidade por exemplo, quando elevada, permite a penetração de substâncias químicas ao

interior do concreto que eventualmente poderão reagir com os componentes hidratados do cimento ocasionando danos que poderão levar as estruturas à ruína.

Nos tópicos a seguir serão discutidos os principais ataques químicos aos quais o concreto está sujeito.

2.4.4.1 ÁGUA PURA

“Água pura, também chamada de água mole, trata-se da água doce dos rios, água subterrânea dos lençóis freáticos, água de lagos e degelo e água de chuva não ácida” (SANTOS, 2012, p. 44).

Ela ataca o concreto através da lixiviação dos componentes da pasta de cimento, isso só acontece devido a água mole conter baixos teores de íons de cálcio e sais dissolvidos o que favorece o processo de dissolução dos componentes contendo cálcio. Um dos mais conhecidos é o hidróxido de cálcio. (SANTOS, 2012, p. 44-45).

O principal sintoma em estruturas atacadas por água pura é a eflorescência, pois ao serem lixiviados, os componentes do cimento, principalmente o hidróxido de cálcio, reage com o gás carbônico presente na atmosfera para formar o carbonato de cálcio, que tem aparência esbranquiçada. Observe o processo na Fig. 3.

Figura 3 – Eflorescência em laje.



Fonte: HELENE, 2013.

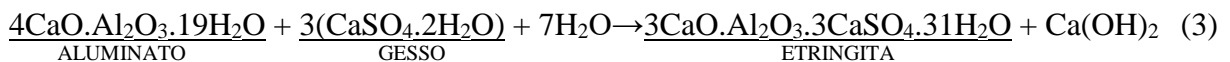
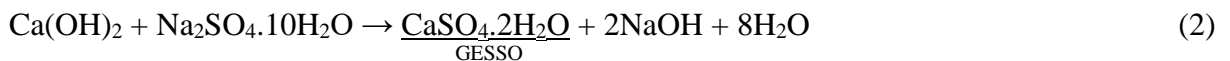
As medidas de prevenções mais eficientes contra o ataque por água pura está na fabricação do concreto, diminuindo sua permeabilidade através de redução no fator água

cimento ou utilização de aditivos impermeabilizantes e no melhoramento das condições de cura. Caso a intervenção venha a ser feita após a estrutura pronta, pode-se impermeabilizar as paredes externas a fim de que a água não venha a percolar em seu interior.

2.4.4.2 SULFATOS

O ataque por sulfatos é ocasionado devido às reações que ocorrem entre íons sulfato e os componentes do cimento hidratado no concreto formando, em sua essência, a etringita que é uma substância extremamente expansiva, gerando tensões internas e fissuração. Após o concreto lascado, a água penetra mais facilmente ao seu interior, acelerando o processo de degradação.

O hidróxido de cálcio, componente do cimento hidratado, reagem com o sulfato de sódio formando sulfato de cálcio (gesso), que por sua vez irá reagir com o aluminato tricálcico hidratado formando a indesejada etringita, que é expansiva. Conforme abaixo:



O concreto fica potencialmente sujeito ao ataque por sulfatos em regiões marinhas, em contato com a água do mar, e através do contato com o lençol freático contaminado.

Figura 4 – Estrutura de canal atacada por sulfatos (certamente água com alto teor de sulfatos).



Fonte: VIANNA apud THOMAZ, 2013.

2.4.4.3 CLORETOS

Os cloretos surgem através da água de amassamento ou agregados, ambos contaminados, intencionalmente através de aditivos aceleradores de pega ou por infiltrações na própria estrutura.

CASCUDO (1997) afirma que os cloretos são os contaminantes mais documentados até hoje como causadores de corrosão dos metais no concreto.

Em relação ao período de propagação da corrosão, (CASCUDO, 1997, p. 46) detalha que:

Os íons Cl^- competem com os íons hidroxila (OH^-) para produção de íons ferrosos pela corrosão. Forma-se então um complexo solúvel de cloreto de ferro. Este pode difundir-se a partir das áreas anódicas destruindo a camada protetora de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ e permitindo a continuação do processo corrosivo. A certa distância do eletrodo o complexo é rompido, precipita o hidróxido de ferro e o íon cloreto fica livre para transportar mais íons ferrosos da área anódica. Uma vez que a corrosão não é estancada, mais íons de ferro continuam a migrar dentro do concreto, a partir do ponto de corrosão, e reagem também com o oxigênio para formar óxidos mais altos que induzem a um volume quatro vezes maior, causando tensões internas e fissuras no concreto. A formação de complexos de cloreto de ferro pode também conduzir a forças internas que levem à fissuração e à degradação do concreto.

Figura 5 – Ataque por cloretos.



Fonte: Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/ataques-por-ions-de-cloreto-custa-r-800-milhoes-por-ano-ao-brasil/>>. Acesso em: 28 maio 2016

2.4.4.4 ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado (RAA) pode se processar no interior do concreto trazendo sérios riscos à estrutura. As consequências mais sérias são: a perda de resistência, diminuição da durabilidade e do módulo de elasticidade.

Geralmente os agregados prejudiciais ao concreto (calcedônia, opalas, ágata, quartzo tectonizado e alguns agregados calcários) reagem com a solução alcalina, resultante da hidratação do cimento, para formar o gel, que absorve água, aumentando seu volume, resultando na fendilhação do concreto.

Veja na ilustração um ataque por RAA à uma estrutura de fundação.

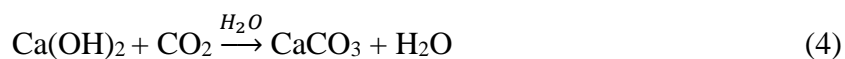
Figura 6 – Fundação atacada por RAA.



Fonte: ANDRADE apud LIMA, 2007.

2.4.4.5 CARBONATAÇÃO

O processo de carbonatação das estruturas de concreto consiste na diminuição da alcalinidade do concreto com o tempo. Essa diminuição deve-se à reação que ocorre devido ao contato entre o componente de caráter básico em maior quantidade (Ca(OH)_2) do concreto com o CO_2 e eventuais gases ácidos (SO_2 e H_2S) presentes na atmosfera. O hidróxido de cálcio ao reagir com o gás carbônico, na presença de água, forma o carbonato de cálcio (CaCO_3), que possui pH baixo, favorecendo a corrosão da armadura. A reação principal acontece da seguinte forma:



Com mais detalhes, FERREIRA (2000), discorre sobre o processo e as defesas criadas pelo próprio concreto:

A carbonatação por si não causa a deterioração do concreto, mas possui efeitos importantes. Um destes efeitos é a retração por carbonatação. No que diz respeito à durabilidade, a importância da carbonatação reside no fato de reduzir o pH da água no concreto endurecido, a partir de valores 12,6 a 13,5 para um valor inferior a 9,0 [Richardson (1988)]. Quando todo o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ estiver carbonatado, o valor de pH é reduzido para 8,3 [Papadakis e Fardis (1992)]. O aço no meio alcalino do concreto, cria uma camada fina de óxido, conhecida como camada de passivação, que adere fortemente ao aço protegendo-o da reação com o oxigênio e a água. Para a manutenção da camada de passivação é necessário que a água presente no concreto tenha um pH elevado. Assim, quando o pH baixar devido à carbonatação, a camada de óxido protetor é eliminada e ocorre a corrosão. Por esta razão, é importante conhecer a profundidade da carbonatação [Scheissl (1987)].

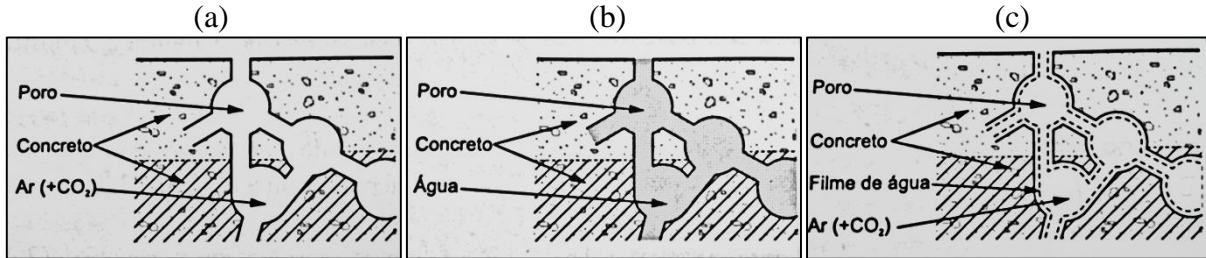
Para que as reações de carbonatação ocorram, é necessário que certas condições sejam atendidas. A Fig. 7 mostra as três condições nas quais uma estrutura está submetida, cada uma delas favorece ou não o acontecimento de reações.

CASCUDO (1997) argumenta que o concreto, por ter sua estrutura microporosa, são os poros que vão determinar as condições de difusão do CO_2 através da forma e quantidade de água existente nos mesmos.

BAKKER (1988) citato por CASCUDO (1997), afirma que há enormes diferenças na taxa de difusão do CO_2 na água se comparada no ar, sendo a difusão na água 10^4 vezes menor.

A quantidade de água presente no meio é fator determinante na velocidade da frente de carbonatação, observe a Fig. 7a que mostra uma estrutura com os seus poros totalmente secos, contendo apenas ar, inviabilizando o processo de carbonatação, por se tratar de uma reação que só acontece na presença de água. Ao contrário, a Fig. 7b mostra a estrutura completamente encharcada com água, tornando ainda o processo de carbonatação quase inexistente devido à baixa taxa de difusão do CO_2 na água. Por fim, a Fig. 7c dispõe de uma estrutura com seus poros parcialmente preenchidos com água, que é a situação mais favorável ao processo de carbonatação.

Figura 7 – Representação esquemática da carbonatação do concreto: a) poros totalmente secos; b) poros saturados com água; e c) poros parcialmente preenchidos com água (concreto com umidade relativa normal do ambiente).



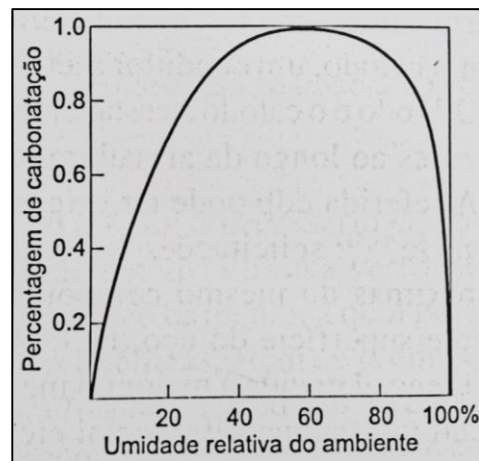
Fonte: BAKKER, 1988 apud CASCUDO, 1997.

HELENE (1986; 1997), apresenta que a carbonatação é dependente do tipo de cimento (deve-se preferir os tipos CP I e CP V, sem adições), das técnicas construtivas (transporte, lançamento, adensamento e cura), das condições ambientais (atmosferas rurais, industriais ou urbanas), da umidade do ambiente e do fator água cimento (quanto maior for, maior será seu coeficiente de permeabilidade).

Com relação aos tipos de cimento CP I e CP V, são os que geram uma maior parcela de Ca(OH)_2 ao concreto após a hidratação do cimento, dificultando o processo de carbonatação ocasionado pelo CO_2 , aumentando o tempo necessário para que o gás carbônico venha a transformá-lo em carbonato de cálcio.

Em relação à umidade do ambiente, ela pode ser favorável ou não ao desenvolvimento da frente de carbonatação. O gráfico mostrado na Fig. 8 indica que os ambientes com umidade em torno de 60% proporcionam uma carbonatação máxima.

Figura 8 – Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente.



Fonte: ROSENBERG et al, 1989 apud CASCUDO, 1997.

Segundo GREGER (1969) citado por HELENE (1986), os ambientes climatizados ($U.R \leq 65\%$ e temperaturas de $23^\circ C$) podem ter o processo de carbonatação intensificado cerca de 10 vezes mais em relação a ambientes úmidos.

A carbonatação do concreto, ao chegar na profundidade da armadura, ocasiona o processo de despassivação da camada protetora do aço. Esta camada protegerá o aço no concreto quando abranger um pH acima de 10,5 e abaixo de 13, meio natural proporcionado pelo concreto HELENE (1986).

Em se tratando de técnicas de medição da profundidade da frente de carbonatação, os indicadores de pH se mostram bem eficientes, uma vez que a queda de pH é o problema maior HELENE (1986). A fenolftaleína e a timolftaleína são os dois indicadores mais utilizados, sendo que o primeiro adquire coloração violeta para pHs iguais ou superiores a 9,5 e o segundo adquire coloração azulada para pHs da ordem de 10,5 ou superiores. Ambos não apresentam mudança de cor para valores de pH abaixo dos valores citados (CASCUDO, 1997).

3. METODOLOGIA

3.1 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso consiste na análise de profundidade de carbonatação em laje de cobertura em concreto armado do tipo “plissé” em um bloco de salas de aula do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, especificamente no bloco D, conforme mostra a Fig. 9.

O bloco foi construído há 5 décadas, certamente foi erguido através da técnica mais comum que é a de produzir o concreto na própria obra, técnica ainda comumente utilizada na execução de pequenas e médias obras.

Figura 9 – Bloco de salas CTD – UFPB.



Fonte: Acervo do autor.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

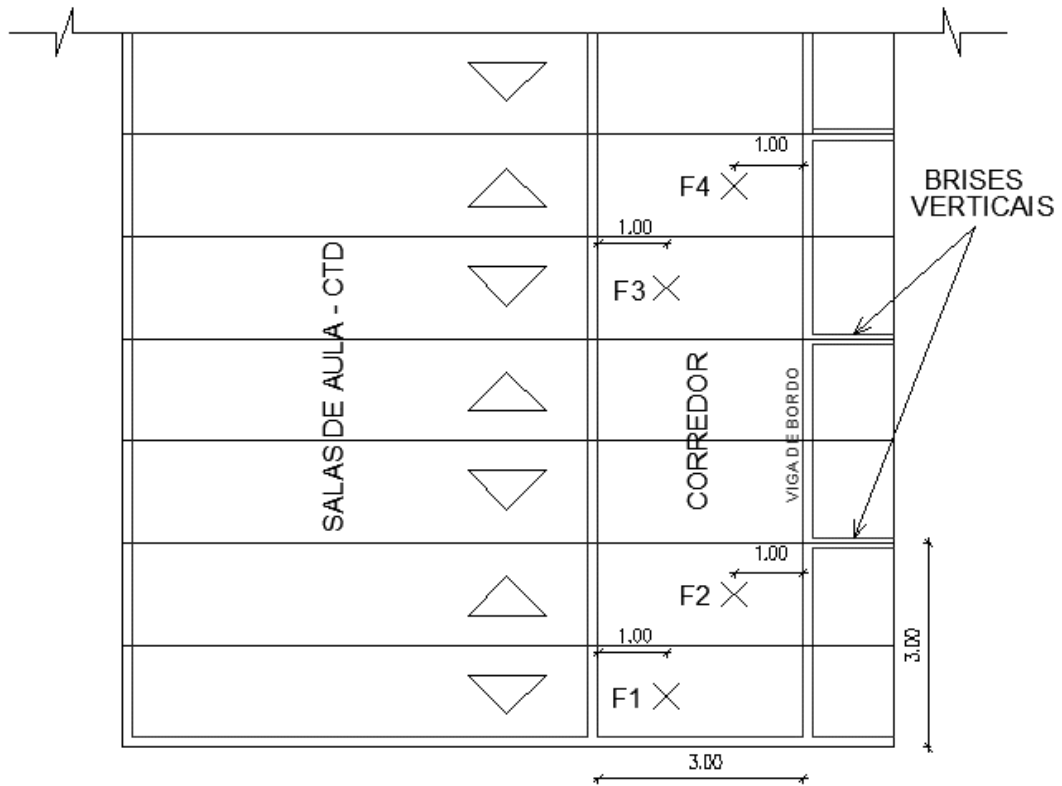
3.2.1 PROCEDIMENTOS DO ESTUDO

Para a análise da profundidade de carbonatação foram extraídas amostras na parte inferior da laje em forma de pó, uma vez que a extração de testemunhos seria uma forma bastante destrutiva, tornando o estudo inviável, do ponto de vista burocrático e executivo.

Desta forma optou-se pela perfuração de pequenos furos, com profundidade de 30 mm e diâmetro de 8,0 mm.

As perfurações foram feitas no corredor do bloco, entre a parede das salas de aula e a viga de bordo, sendo furadas duas águas consecutivas alternadas até o final, chegando até o furo 18 (F18), conforme disposição mostrada na Fig. 10:

Figura 10 – Planta de localização dos furos no bloco e disposição dos mesmos (medidas em metro).



Fonte: Produzido pelo autor.

A parte externa as salas foi escolhida por se tratar de uma área mais acessível e também por se considerar que ela recebe maior carga de gás carbônico e umidade, visto que a área interna possui forro em todas as salas.

Foram colhidas 06 amostras em cada furo, o que totalizou 108 coletas para os 18 furos, procedendo-se da seguinte maneira: 01 amostra era colhida a cada 5,0 mm perfurados. Para coleta precisa, nas profundidades previstas, foi utilizada junto à furadeira a guia de profundidade que controla o limite ajustado para cada amostra.

Na coleta do pó de concreto foi utilizado um recipiente plástico com a broca e o guia de profundidade passando por dentro do mesmo, conforme Fig. 11. Após a coleta de cada amostra o recipiente plástico, a broca e o furo foram limpos, este com um jato de ar e os outros com um pano seco para que as amostras posteriores não fossem contaminadas com o pó de concreto do furo anterior.

Figura 11 – Perfuração e coleta da amostra com recipiente.



Fonte: Acervo do autor.

Após a realização dos furos foi feito o procedimento de lavagem e colmatação de todos com o uso de resina epóxi de alta resistência e retração desprezível.

As amostras foram armazenadas em sacos plásticos para posteriormente, em potes, serem misturadas com a fenolftaleína para a descoberta da profundidade de carbonatação. Isso foi feito para as 108 amostras colhidas onde a mudança de coloração aconteceram naquelas onde o pH apresentou valores $\geq 9,5$.

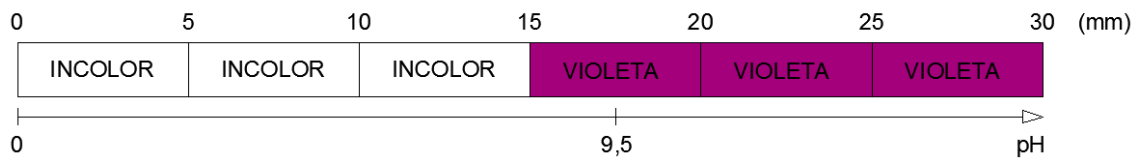
Para a determinação da profundidade de carbonatação foi convencionado que cada amostra representa a profundidade média entre a profundidade inicial e final do furo para cada uma delas, conforme Fig. 12.

Figura 12 - Profundidade à qual cada amostra representa.

0	5	10	15	20	25	30 (mm)
AMOSTRA 1 (2,5 mm)	AMOSTRA 2 (7,5 mm)	AMOSTRA 3 (12,5 mm)	AMOSTRA 4 (17,5 mm)	AMOSTRA 5 (22,5 mm)	AMOSTRA 6 (27,5 mm)	

De acordo com a convenção acima, precisa-se saber qual amostra representa de fato, a profundidade de carbonatação no furo. Adotou-se que, em furos onde as amostras se comportaram de forma cerrada, ou seja, mudando repentinamente de incolor para violeta, foi considerado o pH de 9,5 representado pela primeira amostra tingida de violeta. Veja o exemplo ilustrativo na Fig. 13 representando um furo com uma frente de carbonatação em 17,5 mm.

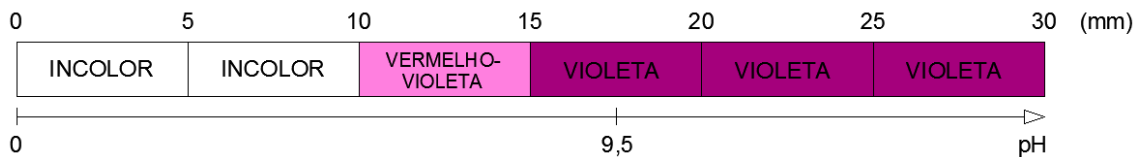
Figura 13 – Escala de cores na determinação da profundidade de carbonatação. No caso, 17,5 mm



Fonte: Produzido pelo autor.

Já em furos com amostras tingidas de violeta de forma gradual, incolor, vermelho-violeta, e violeta, na sequência, considerou-se que o pH 9,5 é evidenciado apenas na primeira amostra de cor “violeta forte”, veja a Fig. 14 ilustrando um furo com amostras mudando de cor gradualmente, traduzindo seu pH de virada apenas na amostra 4 (17,5 mm).

Figura 14 – Escala de cores “gradual” na determinação da profundidade de carbonatação. No caso, 17,5 mm



Fonte: Produzido pelo autor.








3.2.2 ESCOLHA DO INDICADOR ALCALINO

Na escolha do indicador de pH foi levado em consideração o objetivo principal do trabalho, que é descobrir a profundidade real de carbonatação. HELENE (1986) afirma que o precipitado de CaCO_3 possui pH em torno de 9,4 (à temperatura ambiente). Com base nisso, o indicador que muda sua coloração em um pH mais próximo ao precipitado é a fenolftaleína (pH \approx 9,5).

3.2.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados na realização dos furos e nos experimentos estão descritos na tabela a seguir:

Tabela 2 – Materiais utilizados.

DESCRIÇÃO DO MATERIAL	ILUSTRAÇÃO DO MATERIAL
Broca de vídea 8,0 mm utilizada para perfuração da laje.	
Furadeira de alta rotação para perfuração.	
Recipiente plástico (18x18x4) cm para coleta de amostras.	
Saco plástico ZIP 5x7 cm para armazenar as amostras.	
Fenolftaleína 2% alcóolica (1 g de fenolftaleína dissolvida em 50 ml de álcool e 50 g de água).	
Seringa de 5 ml para retirada da fenolftaleína do recipiente de origem e mistura nos potes.	
Potes de 70 ml utilizados para mistura de amostras.	

Resina epóxi de alta resistência.



Espátula para aplicação da resina.



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a análise visual das amostras colhidas (Fig's. 16-33, pág. 34-36) obteve-se diversas profundidades de carbonatação, variando seus valores desde 7,5 mm até 27,5 mm, conforme Tab. 3.

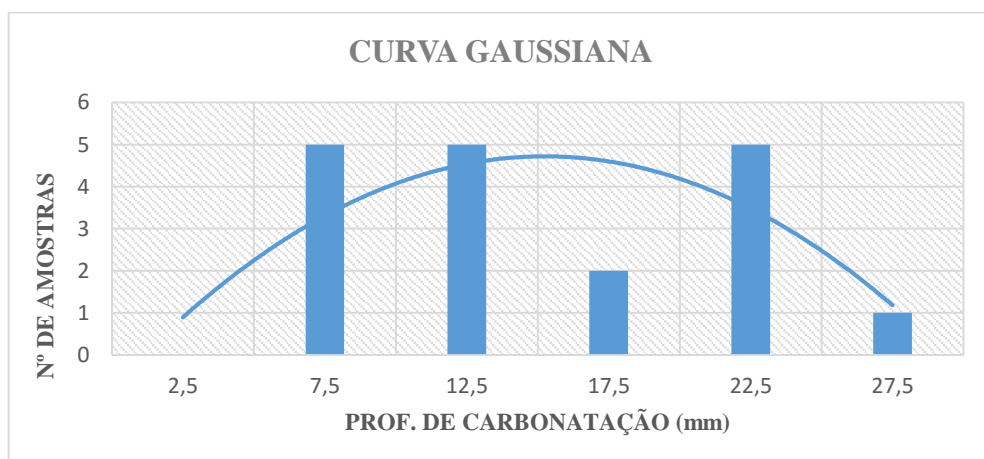
Tabela 3 – Profundidade de carbonatação dos furos.

Furo	Prof. (mm)	Furo	Prof. (mm)
F1	12,5	F11	12,5
F2	22,5	F12	17,5
F3	12,5	F13	22,5
F4	7,5	F14	12,5
F5	7,5	F15	22,5
F6	7,5	F16	7,5
F7	22,5	F17	12,5
F8	22,5	F18	17,5
F9	27,5	Média	15,28
F10	7,5	Desvio padrão (S):	6,69

Para uma análise mais apurada e determinação da profundidade da frente de carbonatação que representa a laje foi feito um tratamento estatístico com os valores das amostras para se ter uma maior confiabilidade nos resultados.

Considerando a hipótese de que a distribuição seja Gaussiana (Fig. 15), foi possível realizar um estudo para um intervalo de média, considerando um nível de confiabilidade de 95%.

Figura 15 – Distribuição das profundidades (curva Gaussiana).



Fonte: Produzido pelo autor.

O intervalo de confiança é dado pela seguinte fórmula:

$$\bar{X} - E \leq \mu \leq \bar{X} + E \quad (5)$$

Onde \bar{X} é a média das amostras e "E" o erro padrão, calculado por:

$$E = t_v \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

Sendo t_v extraído da tabela de distribuição "t de student" ($n < 30$ e $\sigma = S$ (desvio padrão da amostragem), onde v é o grau de liberdade ($n - 1 = 17$), "S" o desvio padrão das amostras e "n" o número de amostras, resultando em:

$$E = t_v \frac{S}{\sqrt{n}} = 2,1098 * \frac{6,69}{\sqrt{18}} = 3,33 \quad (7)$$

Logo:

$$11,95 < \mu < 18,61 \quad (8)$$

Sendo assim, para a média de carbonatação encontrada nos experimentos (15,28 mm), pode-se concluir, com 95% de confiança, que a carbonatação na laje está entre os limites mencionados na equação (8). O nível de confiança nos dá uma certeza de que em 100 repetições dos mesmos experimentos, 95 deles terão média dentro de tal intervalo.

Dentre os resultados dos experimentos, o furo 4 (F4), representado na Fig. 19, chamou bastante atenção por representar uma profundidade de carbonatação muito baixa (7,5 mm), obtendo coloração a partir dos primeiros 5,0 mm, uma vez que a laje tem mais de 5 décadas de existência. As possíveis explicações são bem diversificadas:

1. A perfuração pode ter sido feita em uma área onde o concreto é bastante resistente, bem curado, bem compacto, sem ninhos de concretagem, conseqüentemente bastante impermeável, dificultando a difusão do CO₂;
2. O furo pode ter sido locado sobre uma área já reparada anteriormente, mesmo diante dos cuidados tomados para não acontecer em tal local. Áreas onde foram reparadas possuem um concreto novo, e por esse motivo a profundidade de carbonatação ainda não é expressiva.

O outro furo que requer atenção é o furo 9 (F9), representado na Fig. 24, pois a profundidade de carbonatação foi bastante alta (27,5 mm), mostrando que a laje está com sua armadura seriamente comprometida no local, além de quebrar a "regra" esperada na mudança de coloração, que seria a mudança de cor gradualmente do incolor até o "violeta forte".

Algumas argumentações são pertinentes:

1. Devemos considerar a heterogeneidade do concreto, uma vez que a concretagem da laje em estudo provavelmente deve ter sido feita com concreto fabricado no próprio canteiro, o que dificulta o controle tecnológico do mesmo, tais como fator água cimento, traço dosado em volume, controle do inchamento da areia, qualidade da água utilizada, concentração maior de cimento casual entre outros;
2. A perfuração pode ter sido locada sobre uma junta de concretagem, confirmando mais ainda o fator de heterogeneidade da laje, entre concretos de traços diferentes. Aparentemente a laje tem características homogêneas externamente. Essa homogeneidade externa existe devido a execução da laje ter sido, provavelmente, com formas novas, o que faz com que a nata de cimento se junte bem à forma gerando uma superfície sem juntas.

Figura 16 – Furo 01: profundidade: 12,5 mm



Figura 17 – Furo 02: profundidade: 22,5 mm



Figura 18 – Furo 03: profundidade: 12,5 mm



Figura 19 – Furo 04: profundidade: 7,5 mm



Figura 20 – Furo 05: profundidade: 7,5 mm



Figura 21 – Furo 06: profundidade: 7,5 mm



Figura 22 – Furo 07: profundidade: 22,5 mm



Figura 23 – Furo 08: profundidade: 22,5 mm



Figura 24 – Furo 09: profundidade: 27,5 mm



Figura 28 – Furo 13: profundidade: 22,5 mm



Figura 25 – Furo 10: profundidade: 7,5 mm

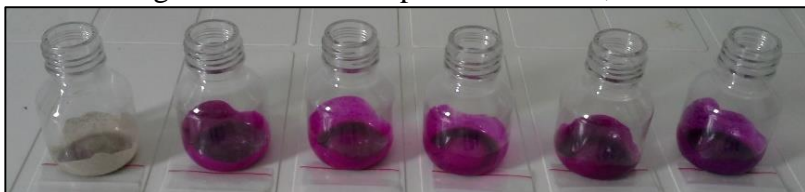


Figura 29 – Furo 14: profundidade: 12,5 mm



Figura 26 – Furo 11: profundidade: 12,5 mm



Figura 30 – Furo 15: profundidade: 22,5 mm



Figura 27 – Furo 12: profundidade: 17,5 mm



Figura 31 – Furo 16: profundidade: 7,5 mm



Figura 32 – Furo 17: profundidade: 12,5 mm



Figura 33 – Furo 18: profundidade: 17,5 mm



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Com a constatação da profundidade de carbonatação entre 11,95 e 18,61 mm é possível concluir que toda a armadura próxima à superfície está comprometida pela corrosão ocasionada devido a carbonatação, uma vez que as armaduras mais superficiais estão em profundidades inferiores a 15 mm.

A carbonatação na laje já atingiu maciçamente as armaduras, implicando na necessidade urgente de serviços de recuperação estrutural mais adequado para o caso. Dessa forma, a execução dos serviços sendo implementados no presente momento, irão evitar custos bem mais elevados caso os serviços sejam postergados.

O estudo das patologias no concreto, em especial o da carbonatação é extremamente interessante, pois além de mostrar os agentes agressores aos quais as estruturas em concreto estão expostas, também mostra as inúmeras alternativas disponíveis que podem ser postas em prática através do engenheiro e de todos os que estão envolvidos, para que as estruturas não apresentem patologias ou venham a ser corrigidas satisfatoriamente durante todo o período de vida útil.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do estudo realizado sugerem-se os seguintes temas para estudos futuros que venham a contribuir para um diagnóstico completo da corrosão da laje:

- Avaliação do cobrimento médio das armaduras inferiores relacionando-o com a profundidade de carbonatação;
- Verificação da presença de ataques de cloretos à corrosão da laje;
- Verificação da profundidade de carbonatação através da obtenção do pH de todas as colorações.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118/2014: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-1: Edificações Habitacionais — Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro, 2013, 60 p.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado.** Tradução de Maria Celeste Marcondes, Carlos W. F. dos Santos, Beatriz Cannabrava. 1 ed. São Paulo: Pini, 1988. 522 p.

CASCUDO, O. M. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeções e técnicas eletroquímicas.** 1 ed. Goiânia – GO: Pini, 1997. 237 p.

FERREIRA, R. M. **Avaliação de Ensaios de Durabilidade do Betão.** 2000. Dissertação (Materiais e Reabilitação da Construção) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães – Portugal, 2000.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado.** 1 ed. São Paulo: Pini: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986. 46 p.

_____. **Os principais mecanismos de deterioração que prejudicam a vida útil da estrutura.** In: 55º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. 2013. Gramado/RS. Disponível em: <<http://www.ibracon.org.br/eventos/55CBC/PDFS/phd.pdf>>. Acesso em: 12 maio 2016.

_____. **Vida útil das estruturas de concreto.** In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade. Anais. Porto Alegre. 1997. p. 1-30.

LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto.** 2008. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

LIMA, R. B. S; SILVA, A. S. R; COSTA, F. N. **Reação álcali agregado e seus efeitos na construção de edifícios.** Artigo científico. Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/carmeane/materiais/ART_020709>. Acesso em: 28 maio 2016.

POLITO, G. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, Janeiro, 2006.

SANTOS, M. R. G. **Deterioração das estruturas de concreto armado – estudo de caso**. 2012. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SOUZA, V. C; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1 ed. São Paulo: Pini, 1998. 255 p.

THOMAZ, E. C. S. **Ataque de sulfatos ao concreto de cimento Portland**. Notas de aula. Disponível em:
<http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/ataque_por_sulfatos.pdf>. Acesso em: 27 maio 2016.

VILASBOAS, J. M. L. **Durabilidade da Edificações de Concreto Armado em Salvador: uma contribuição para implantação da NBR 6118:2003**. 2004. Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.