

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

Lucas Affonso de Oliveira

**RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO: Os mecanismos
de degradação no meio urbano e procedimentos de terapia**

Belo Horizonte

2022

Lucas Affonso de Oliveira

RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO: Os mecanismos de degradação no meio urbano e procedimentos de terapia

Versão Final

Monografia de especialização apresentada ao Departamento de Engenharia de Materiais e construção Civil UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, como requisito parcial à obtenção do título de especialização em construção Civil

Orientador: Aguiar, Jose Eduardo de.

Belo Horizonte

2022

O48r

Oliveira, Lucas Affonso de.

Recuperação de estruturas em concreto armado [recurso eletrônico] : os mecanismos de degradação no meio urbano e procedimentos de terapia / Lucas Affonso de Oliveira. – 2022.

1 recurso online (57 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Jose Eduardo Aguiar.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Bibliografia: f. 56-57.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil. 2. Concreto armado. 3. Carbonatação.
4. Corrosão. I. Aguiar, Jose Eduardo de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Roseli Alves de Oliveira CRB/6 2121
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

ALUNO: LUCAS AFFONSO DE OLIVEIRA

MATRÍCULA: 2021669003

RESULTADO

Aos 06 dias do mês de outubro de 2022 realizou-se a defesa da MONOGRAFIA de autoria do aluno acima mencionado sob o título:

“RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO: OS MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO NO MEIO URBANO E PROCEDIMENTOS DE TERAPIA”

Após análise, concluiu-se pela alternativa assinalada abaixo:

APROVADO

APROVADO COM CORREÇÕES

REPROVADO

NOTA: 80

CONCEITO: B

BANCA EXAMINADORA:

Nome

Prof. Dr José Eduardo de Aguiar

Assinatura

JOSE EDUARDO DE AGUIAR:2997940460
4

Assinado de forma digital por JOSE EDUARDO DE AGUIAR:29979404604
Dados: 2022.10.07 08:37:35 -03'00'

Nome

Profª. Drª. Sidnea Eliane Campos Ribeiro

Assinatura

Sidnea Eliane Campos Ribeiro:67676685672

Assinado digitalmente por Sidnea Eliane Campos Ribeiro:67676685672
Dados: 2022.10.07 08:37:35 -03'00'

O candidato faz jus ao grau de "ESPECIALISTA EM CONSTRUÇÃO CIVIL: "GESTÃO E TECNOLOGIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL"

Belo Horizonte, 06 de outubro de 2022

Antônio Neves de Carvalho Júnior

Assinado de forma digital por Antônio Neves de Carvalho Júnior
Dados: 2022.11.17 15:47:52 -03'00'

Coordenador do Curso

Lucas Affonso de Oliveira

**RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO: Os mecanismos
de degradação no meio urbano e procedimentos de terapia**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 06 de outubro de 2022, ao Curso de Especialização em construção Civil, aprovado pela banca examinadora constituída dos professores:

Prof. Dr. José Eduardo de Aguiar

UFMG – Escola de Engenharia

Profa. Dra. Sidnea Eliane Campos Ribeiro

UFMG – Escola de Engenharia

Resumo

As estruturas de concreto, assim como todos os outros materiais empregados na construção civil, possuem uma vida útil. No meio urbano, há vários fatores que influenciam a perda de desempenho do concreto armado podendo resultar em grandes catástrofes. Através de um estudo na compreensão dos fenômenos que ocorrem nas estruturas, é possível elaborar métodos de recuperação nos quais são possíveis restaurar as características originais das mesmas. A carbonatação do concreto é uma das principais reações que ocorrem no concreto e causam grandes manifestações patológicas. Com esse processo, ocorre uma redução no PH do concreto que tira as armaduras do estado de passivação, com isso o aço inicia o processo de corrosão no qual aumenta sua seção em até 8 vezes, causando a ruptura do concreto. Através de visitas *in loco* em obras de arte especial na cidade de Belo Horizonte, foi constatado vários pontos apresentando essas manifestações patológicas em sua estrutura. Para recuperar a estrutura de concreto é necessário que sejam realizados procedimentos específicos no qual garantirá um prolongamento de sua vida útil.

Palavra-chave: Vida Útil. Concreto armado. Carbonatação. corrosão

Abstract

Concrete structures, like all other materials used in construction, have a useful life. In urban areas, there are several factors that influence the loss of performance of reinforced concrete, which can result in major catastrophes. Through a study in the understanding of the phenomena that occur in the structures, it is possible to elaborate recovery methods in which it is possible to restore the original characteristics of the same. The carbonation of concrete is one of the main reactions that occur in concrete and causes major pathological manifestations. With this process, there is a reduction in the PH of the concrete that takes the reinforcements from the passivation state, with this the steel starts the corrosion process in which its section increases by up to 8 times, causing the concrete to rupture. Through on-site visits to special works of art in the city of Belo Horizonte, it was found several points presenting these pathological manifestations in their structure. To recover the concrete structure it is necessary to carry out specific procedures which will guarantee an extension of its useful life.

Keyword: Useful Life. Reinforced concrete. carbonation. corrosion

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1- Primeiras impressões durante a visita ao complexo da lagoinha | 12 |
| Figura 2- Conceito de vida útil de estruturas de concreto | 16 |
| Figura 3- Variação do desempenho de estruturas de concreto | 16 |
| Figura 4- Microestrutura do CSH Observada após 180 dias..... | 18 |
| Figura 5- Placas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | 18 |
| Figura 6- Distribuição da água na microestrutura do concreto | 19 |
| Figura 7- Caminhos para entrada de agentes agressivos na estrutura do concreto. | 20 |
| Figura 8- Diâmetro dos poros do concreto. | 21 |
| Figura 9- Dimensão dos poros x mecanismos de entrada de agentes agressivos ao concreto. | 22 |
| Figura 10 -Trânsito intenso no complexo da lagoinha | 23 |
| Figura 11- Diagrama de Pourbex do ferro | 24 |
| Figura 12- Deslocamento do concreto devido ao aumento de seção da barra de ferro no processo corrosivo. | 26 |
| Figura 13- incêndio provocado por moradores de rua no viaduto Sarah Kubitschek | 27 |
| Figura 14- Armaduras expostas na base do pilar | 29 |
| Figura 15- Deslocamento na laje da passarela..... | 30 |
| Figura 16- Deslocamento e fissuras ao longo do pilar..... | 30 |
| Figura 17- Ferrugem expostas e trincas nas vigas..... | 31 |
| Figura 18- Limpeza das vigas do complexo da lagoinha, na entrada do túnel exclusivo para ônibus do túnel da lagoinha | 32 |
| Figura 19- Limpeza das new Jersey do complexo da Lagoinha | 33 |
| Figura 20- Passarela de acesso a estação de metrô Vila Oeste antes da lavagem..... | 33 |
| Figura 21- Passarela de acesso a estação de metrô Vila Oeste depois da lavagem..... | 33 |
| Figura 22- Escarificação do pilar do viaduto da Lagoinha com uso de martetele 10Kg..... | 36 |
| Figura 23- Escarificação da estrutura do Monumento na Praça Rio Branco | 36 |
| Figura 24- Escarificação do pilar na passarela da rua Jose Viola..... | 37 |
| Figura 25- Face do pilar totalmente escarificada da Rua Jose Viola | 37 |
| Figura 26- Classificação do Ph através da coloração do substrato quando submergido a solução de fenolftaleína | 38 |
| Figura 27- Aspersão de fenolftaleína na estrutura do concreto, constatando um Ph abaixo de 8,3..... | 39 |

| | |
|--|----|
| Figura 28- Aspersão de fenolftaleína na estrutura do concreto, constatando um Ph acima de 9,5..... | 39 |
| Figura 29- Delimitação da área escarificada no monumento da praça Rio Branco | 40 |
| Figura 30 -Delimitação da área escarificada no pilar da passarela da Rua Jose Viola..... | 40 |
| Figura 31- Jateamento de abrasivo na armadura do pilar | 41 |
| Figura 32- Armadura parcialmente limpa com uso de abrasivo..... | 42 |
| Figura 33- Limpeza das armaduras de forma mecanizada, utilizando lixadeira e furadeira com escovas metálicas | 42 |
| Figura 34 - Armadura limpa com uso de escovas metálicas | 43 |
| Figura 35- Perda de seção do aço no processo de corrosão | 44 |
| Figura 36- Perda de seção do aço no processo de corrosão | 44 |
| Figura 37- Ferragens sendo complementadas com uso de adesivo estrutural..... | 45 |
| Figura 38- Aplicação de inibidores anódicos na estrutura (sikatop 108) no viaduto da Av Americo Vespúcio..... | 46 |
| Figura 39- Aplicação de inibidores catódicos na estrutura (cromato de Zinco) do viaduto da Lagoinha..... | 47 |
| Figura 40- Aplicação de argamassa polimérica manualmente | 49 |
| Figura 41- Aplicação de argamassa polimérica por projeção | 50 |
| Figura 42- Aplicação de argamassa com auxílio de colher de pedreiro | 50 |
| Figura 43- Acabamento do reparo | 51 |
| Figura 44- Montagem de forma no local do reparo mais profundo | 52 |
| Figura 45- Preenchimento da forma com microconcreto..... | 52 |
| Figura 46- Cura do reparo com aspersão de água..... | 53 |
| Figura 47- Cura do local de reparo com uso de manta geotêxtil úmida | 54 |
| Figura 48- Pintura da estrutura com utilização de rolo de lã | 55 |
| Figura 49- Pintura da estrutura com utilização de máquina de pintura Airless..... | 56 |
| Figura 50- Antes das Intervenções | 58 |
| Figura 51- Depois das intervenções | 58 |

Sumário

| | |
|--|----|
| Introdução..... | 11 |
| Capítulo 1: | 13 |
| Problema, objetivos, justificativa e metodologia | 13 |
| Capítulo 2: | 15 |
| Revisão Bibliográfica | 15 |
| Capítulo 3: | 28 |
| Procedimentos executivos para recuperação de estruturas de concreto armado | 28 |
| Capítulo 4: | 29 |
| Inspeção visual | 29 |
| Capítulo 5: | 32 |
| Limpeza da superfície da estrutura | 32 |
| Capítulo 6: | 35 |
| Remoção do concreto | 35 |
| Capítulo 7: | 38 |
| Ensaio para medição da frente de carbonatação do concreto | 38 |
| Capítulo 8: | 40 |
| Delimitação da área de reparo | 40 |
| Capítulo 9: | 41 |
| Limpeza das armaduras..... | 41 |
| Capítulo 10: | 44 |
| Complemento das Armaduras..... | 44 |
| Capítulo 11: | 46 |
| Aplicação de inibidores de corrosão | 46 |
| Capítulo 12: | 48 |
| Fechamento de reparos rasos | 48 |
| Capítulo 13: | 53 |
| Cura da área de reparo | 53 |

| | |
|----------------------------|----|
| Capitulo 14: | 55 |
| Pintura da estrutura | 55 |
| Capitulo 15: | 57 |
| Considerações finais..... | 57 |
| Capitulo 16: | 59 |
| Referencias..... | 59 |

Introdução

Atualmente no meio urbano, é comum ser observado em meio as inúmeras estruturas de concreto severos problemas de degradação proveniente de vários fatores. Afim de conservar essas estruturas e mantê-las em funcionamento por um período maior, é necessário que se haja uma compreensão maior dos fenômenos que ocorrem nas estruturas de concreto armado que causam essa série de patologias nas quais são notadas em meio urbano.

Uma vez que todos esses fenômenos de degradação são compreendidos, é possível avaliar quais são os principais mecanismos de proteção que podem ser instalados na estrutura para que não haja mais esse tipo de processo, aumento assim a vida útil da estrutura.

No meio urbano, é fácil ser observado a grande concentração de poluição. Essa está totalmente relacionada com a grande quantidade de agente agressivos nos quais nossas estruturas de concreto são submetidas a todo o tempo. Devido a grande quantidade de carros na quais circulam nessas regiões, o CO² que é um inimigo do concreto armado pode ser considerados um dos principais agentes agressivos que geram as degradações na quais estamos tratando. Além desse, a concentração de cloretos proveniente de chuvas acidas e excesso de sulfato vindo de processos industriais também são muito relevantes no que se refere aos mecanismos de degradação.

Para cada situação é necessário tomar uma medida diferente. A partir da compreensão de como cada processo químico acontece, é possível desenvolver metodologias de recuperação das estruturas de forma com que mesmo com a presença desses agentes agressivos, o concreto armado não sofra tanto.

Após vistorias em algumas Obras de Arte especial na cidade de Belo Horizonte, foi possível realizar um cadastro das principais ocorrências de manifestações patológicas nessas estruturas de concreto armado. Como observado na Figura 1, o deslocamento do concreto devido a corrosão das armaduras é algo recorrente.

As Figuras quando não referenciadas são de autoria do próprio autor.

Figura 1- Primeiras impressões durante a visita ao complexo da lagoinha



Tendo em vista as principais manifestações patológicas encontradas nas obras de arte especial na cidade de Belo Horizonte obtidas através de visitas *in loco*, será elaborado neste trabalho, através de um referenciamento bibliográfico sobre os principais agentes agressivos do concreto armado e os seus mecanismos de ingresso a estrutura, métodos executivos nos quais será possível restaurar a vida útil da estrutura.

Capítulo 1:

Problema, objetivos, justificativa e metodologia

1.1. Problema

Dentro do meio urbano, quais são as principais fontes de agentes agressivos ao concreto armado, quais são seus mecanismos de degradação e quais são os procedimentos corretos para a sua recuperação?

1.2. OBJETIVOS:

- **Geral:**

Apresentar a metodologias de recuperação de estruturas em concreto armado a partir da compreensão dos fenômenos que as causam

- **Específicos:**

- Compreender as fontes e mecanismos de degradação do concreto em meio urbano
- Descrever os mecanismos de proteção da estrutura de concreto com a recuperação devidamente executada.

1.3. JUSTIFICATIVA:

A pesquisa se justifica uma vez que ao longo dos últimos anos vem aumentando a incidência de acidentes decorrentes da falta de cuidado com as estruturas de concreto, como por exemplo o edifício Andrea em fortaleza em 2019 que deixou 3 mortos.

Para entender melhor as metodologias de recuperação, é necessário investigar melhor sobre as causas dessa degradação, sendo assim importante compreender os aspectos químicos e físicos de todos os processos.

1.4. METODOLOGIA:

Para realizar esta pesquisa, as seguintes etapas serão realizadas:

- Estudo com referencial bibliográfico das ações físicas e químicas nas quais justifiquem a ocorrência desses problemas

- Estudo de caso, analisando as possíveis causas da degradação

- Propor uma metodologia de recuperação em nosso estudo de caso, através de referencial bibliográfico e correlacionando as intervenções com os itens já citados.

Capítulo 2:

Revisão Bibliográfica

2.1. Vida útil de uma estrutura de concreto armado

Segundo Piancastelle (1997), uma vez que as estruturas de concreto armados são feitas de materiais não inertes, ao longo do tempo devido as interações entre os elementos dos materiais que os constituem (cimento, areia, brita e aço) e os agentes externos nos quais os mesmos estão expostos (Ácidos, bases, Sais, gases e outros).

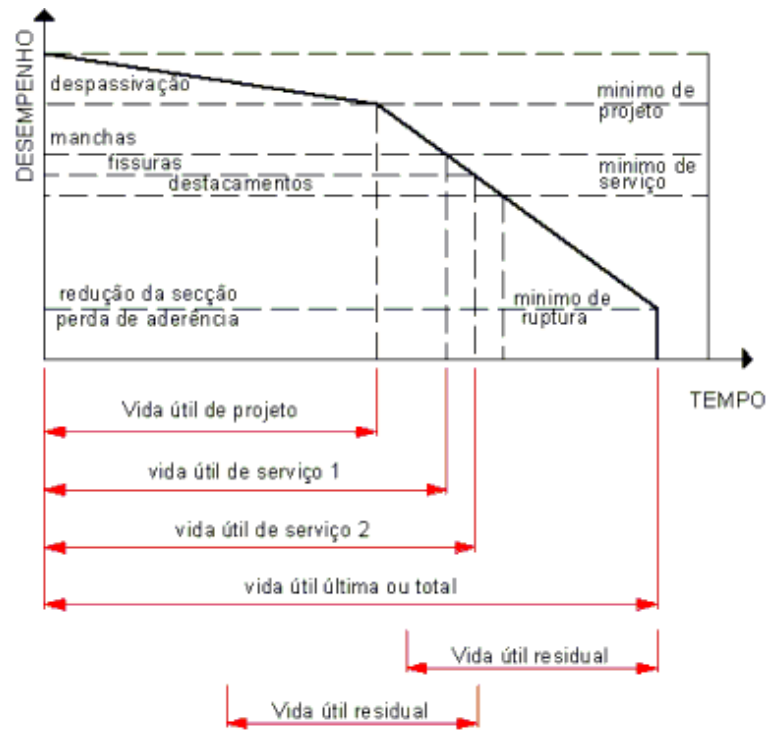
Nos estudos das patologias na construção civil, alinhado com os conceitos da medicina, é o estudo da origem, causa e natureza das “doenças” que podem ocorrer ao longo da vida útil da estrutura causando falhas do seu desempenho podendo levar até mesmo a grandes tragédias.

Para começarmos a embasar nossos estudos sobre a recuperação das estruturas de concreto armado temos que definir alguns conceitos muito importantes, como por exemplo o a definição de vida útil de uma estrutura.

Segundo Porson (2010), a vida útil de uma estrutura pode ser definida como o tempo durante o qual uma estrutura e seus componentes conseguem manter suas características originais e satisfazer os requisitos de desempenho do projeto, sem grandes ações imprevistas de manutenção e reparo.

Essas definições também podem ser observadas nas Figuras 2 e 3, onde HELENE (1997) também conceitua a vida útil de uma estrutura (com e sem intervenções) relacionado a perda de desempenho da estrutura ao longo de sua idade.

Figura 2- Conceito de vida útil de estruturas de concreto



Fonte: Helene, p.28. 1995

Figura 3- Variação do desempenho de estruturas de concreto



Fonte: Helene, p.29. 1997

Como podemos ver nos gráficos acima, é possível aumentar a vida útil das estruturas com corretas técnicas de reparo, entretanto hoje no Brasil, não existem normas específicas para este tema abordado, mas podemos realizar correlações com outras normas para definirmos alguns parâmetros de pesquisa, como por exemplo a NBR 6118, na qual aborda estruturas de concreto em si.

2.2. Microestrutura do Concreto

Para que se haja uma compreensão maior sobre os processos químicos nos quais ocorrem em nossas estruturas de concreto, é necessário conhecer melhor a estrutura de seus compostos (cimento, agregado e água)

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico produzido através da moagem do clínquer, no qual é formado por basicamente por Silicatos de cálcio hidráulicos e geralmente uma ou mais formas de sulfato de cálcio como um produto de adição.

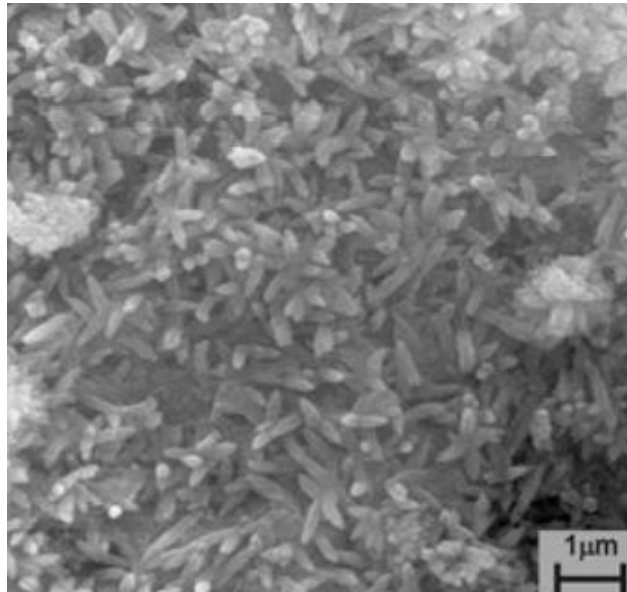
Pode-se dividir a microestrutura do concreto em três fases: Fase pasta, fase agregado e fase de transição.

A fase pasta (matriz) é formado por parte sólidos, vazios e água. Dentro a parte dos sólidos podemos encontrar três principais compostos nos quais atribuem algumas importantes características ao nosso concreto:

- C-S-H:

Representando cerca de 50% a 60% dos sólidos encontrados na fase pasta do cimento. Muito importante para a resistência a compressão do concreto também.

Figura 4- Microestrutura do CSH Observada após 180 dias

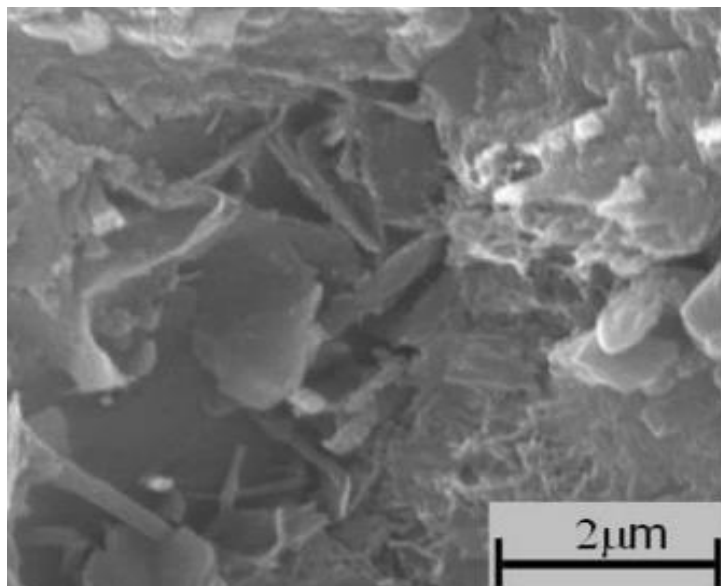


Fonte: Daniel Veras, p.120. 2019

- Ca(OH)_2

Também conhecido como Hidróxido de cálcio, representa cerca de 20% a 25% dos sólidos encontrados na fase pasta do cimento. É o responsável pela alcalinidade do concreto, fator importante para a durabilidade das estruturas de concreto armado.

Figura 5- Placas de Ca(OH)_2



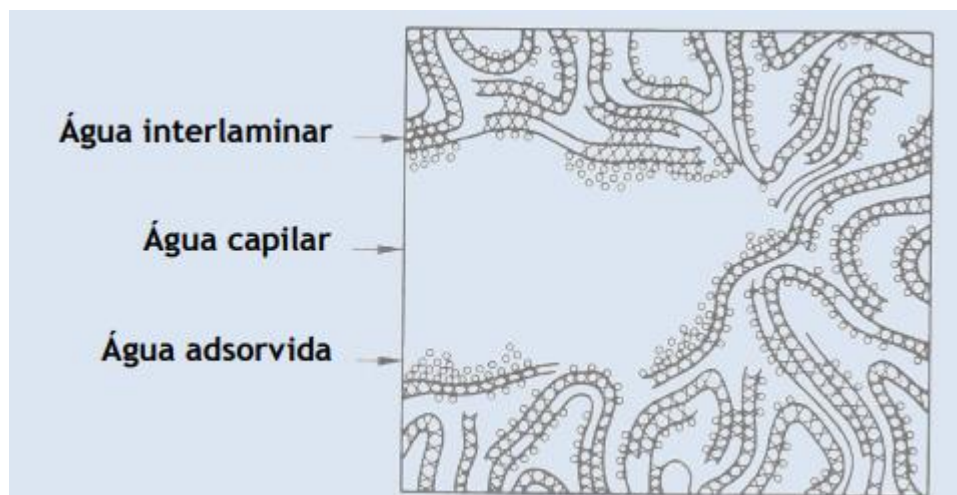
Fonte: Daniel Veras, p.125, 2019

- Etringita:

Representa cerca de 15% a 20% dos sólidos encontrados na fase pasta do cimento. É o responsável pela aderência do concreto no substrato.

Os espaços vazios também são encontrados dentro da microestrutura do concreto e também podem ser classificados como Inter laminar ou Inter partícula (1nm), capilares, micróporos (< 50nm) e macroporos (>50nm). Assim como a água na qual continua presente na estrutura de forma livre nos poros capilares, adsorvida em meio aos sólidos, Inter laminar na estrutura do C-S-H e também quimicamente combinado com os produtos hidratados.

Figura 6- Distribuição da água na microestrutura do concreto



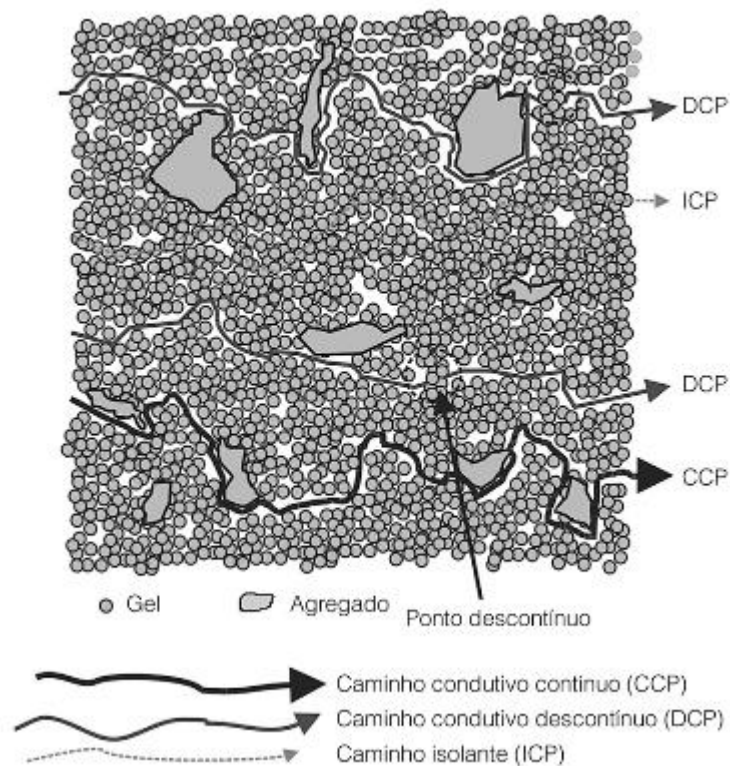
Fonte: Daniel Veras, p.181. 2019

A fase hidratada, é o principal responsável pela massa específica do concreto, módulo de elasticidade, estabilidade dimensional do concreto, além de influenciar a resistência e durabilidade do concreto. Também é muito importante economicamente por ser um grande redutor de custos

Já a fase de transição, apesar de ser muito semelhante a fase pasta, ela tem uma característica muito importante na qual influencia muito no concreto. Por ser justamente aquela faixa que fica entre a fase agregado e fase pasta (por isso é

chamada de fase de transição), devido a uma película de água que se forma adsorvida pelo agregado, ela possui naquela região uma relação água/cimento mais elevada que a fase pasta. Conseqüentemente possui uma porosidade maior, facilitando a entrada de agentes agressivos ao concreto conforme podemos ver na figura esquemática abaixo, e uma resistência menor, sendo justamente onde ocorre a ruptura do concreto. Esta fase pode ser considerada do elo fraco da microestrutura do concreto.

Figura 7- Caminhos para entrada de agentes agressivos na estrutura do concreto.



Fonte: Daniel Veras, p.197, 2019

2.3. Porosidade e mecanismos de entrada de agentes agressivos no concreto

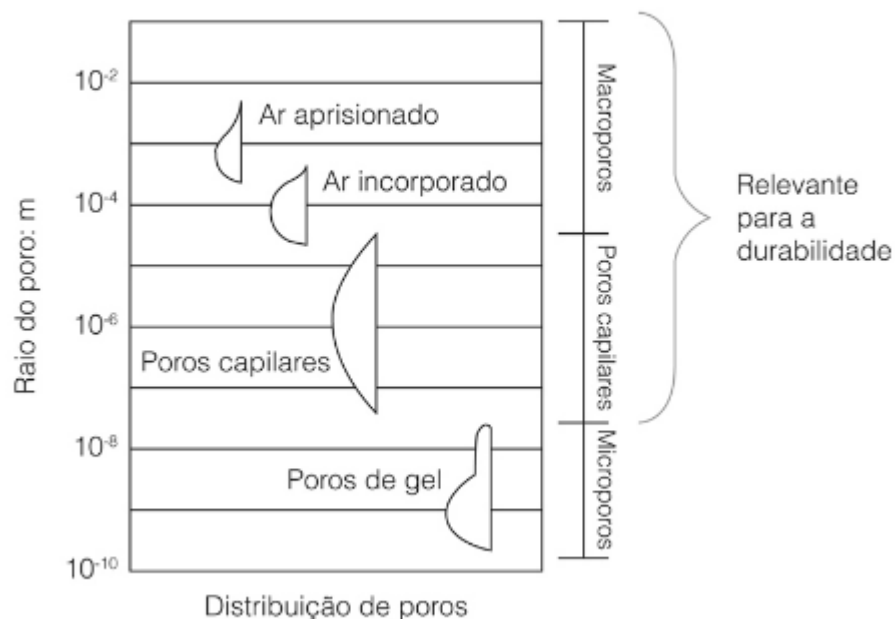
Conforme foi-se observado anteriormente, dentro do concreto existem vazios nos quais facilitam a entrada de agentes agressivos em sua estrutura. Isso é provocado

pelo excesso de água adicionado a mistura (além do necessário para hidratação do cimento), que ao se evapora deixam para trás esses caminhos nos quais comprometem a durabilidade da estrutura.

Segundo Freire, podem ser classificados como: Poros capilares, gerado a partir da saída de água livre no concreto; poros de gel, obtidos pelo silicato de cálcio hidratado; poros de ar incorporado, formado pelo uso de aditivos incorporadores de ar; e poros de ar aprisionado, obtidos pelo adensamento do concreto.

Conforme a Figura 8, é possível classificar o tamanho relativo de cada um deles:

Figura 8- Diâmetro dos poros do concreto.



Fonte: Fonte: Freire, p.198, 2005

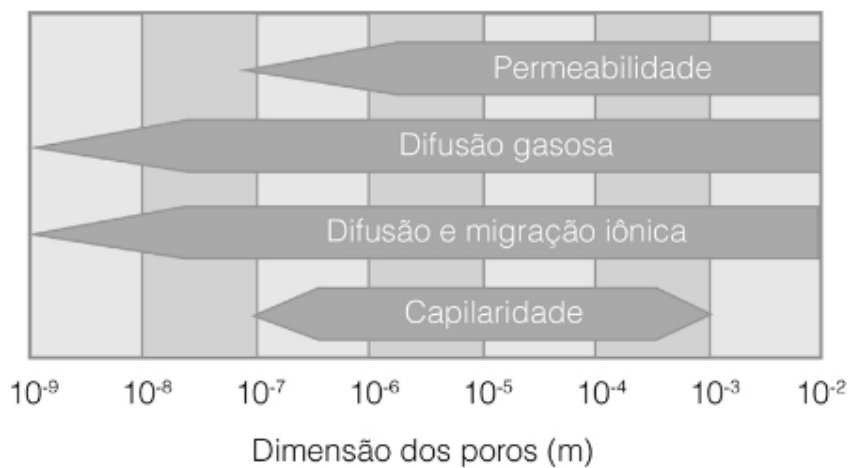
O tamanho desses poros contribui diretamente para o mecanismo no qual irá transportar os agentes agressivos do meio externo para o interior do concreto. Esses mecanismos podemos classificar como: Permeabilidade, Difusão gasosa, migração iônica e capilaridade.

- Permeabilidade: é caracterizado pelo fluxo de fluido através de um sólido poroso devido a uma diferença de pressão.
- Capilaridade: Ocorre devido a tensão superficial na qual atua sobre os poros do concreto, no qual leva o fluido para dentro

- Difusão: Acontece devido a diferença de concentração da substancia do ambiente externo para o interno do concreto
- Migração: Processo de transporte que ocorre quando existe um potencial elétrico que possibilita o deslocamento dos íons presentes para que se neutralize o efeito da diferença de potencial.

Conforme a Figura 9, pode-se relacionar a dimensão dos poros com os mecanismos de entrada de agentes agressivos ao concreto

Figura 9- Dimensão dos poros x mecanismos de entrada de agentes agressivos ao concreto.



Fonte: Freire, p.199, 2005

Como pode-se analisar agora, a formação de poros capilares é um dos mais problemáticos para a durabilidade do concreto. Uma vez que a formação deste, fornece uma longa rede de caminhos nas quais favorecem a entrada de agentes agressores ao interior do concreto de várias formas possíveis já vista anteriormente.

2.4. Causas e consequências do transporte de substancia agressivas ao interior do concreto

Como principal objeto de estudo, vamos analisar neste capítulo os principais causas e consequências do transporte de substancias agressivas ao concreto em meio urbano, tendo como base de estudos a cidade de Belo Horizonte.

Os efeitos nas quais as ações climáticas podem influenciar na estrutura, podem variar dependendo muito do microclima na qual a estrutura está inserida quanto o microclima no qual em algumas situações a própria estrutura pode criar. Segundo HELENE, o macroclima pode ser dividido em: Rural, Urbano, Industrial, marinho ou viciado (locais fechados com baixa taxa de renovação do ar).

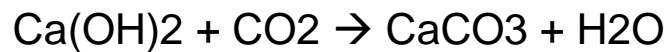
O meio urbano, objeto de nossos estudos, pode ser definido como uma região de ar livre com uma grande densidade demográfica, na qual normalmente possui uma atmosfera carregada com impurezas como óxidos de enxofre (SO_2), fuligem acida e outros agentes agressivos, principalmente como CO_2 , oriundo de descargas de automóveis conforme Ilustrado na Figura 10

Figura 10 -Trânsito intenso no complexo da lagoinha



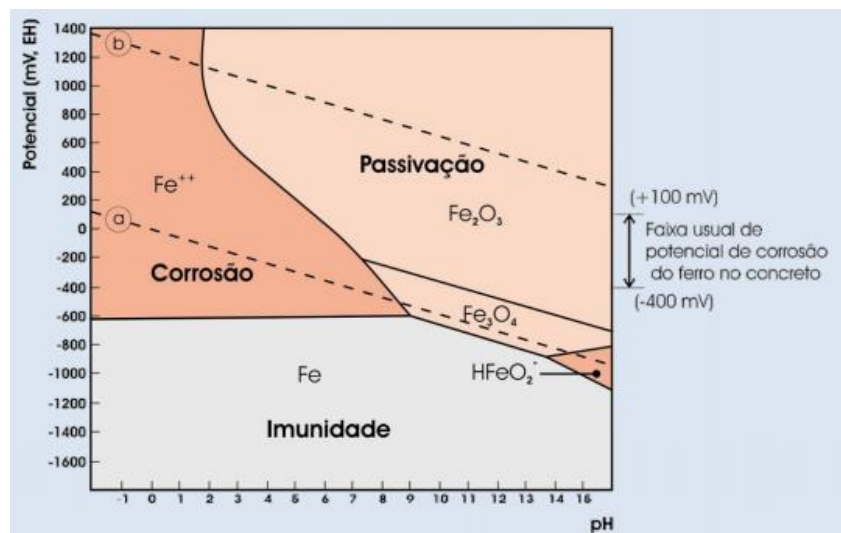
O concreto nas primeiras idades é um material alcalino devido ao hidróxido de cálcio, formado na hidratação do cimento. Entretanto, com a entrada do CO₂ em sua estrutura, essa alcalinidade vai diminuindo conforme o tempo vai passando e mais agentes agressivos destes vai entrando para o seu interior. Esse processo ocorre por difusão e é chamado de carbonatação do concreto.

A equação química deste fenômeno fica representado da seguinte maneira:



Com essa redução de Ph do concreto, as armaduras nas quais estão localizadas no interior do concreto sai do que chamamos de zona de passivação do ferro, conforme pode ser observado na Figura 11.

Figura 11- Diagrama de Pourbeix do ferro



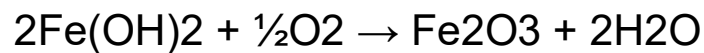
Fonte: Pourbeix, p.235. 1973

Com a saída da armadura que compõe o concreto armado da zona de imunidade, o mesmo precisa apenas de H₂O e O₂ entre em contato para que o início da corrosão se instale.

2.5. Conceitos básicos de corrosão

A corrosão pode ser definida como a perda de propriedades de um metal devido a uma ação química ou eletroquímica do meio ambiente, podendo haver ou não esforços mecânicos.

Os materiais tendem sempre a buscar seus estados de menor energia. As armaduras de ferro, de certa forma buscam no meio na qual ela se encontra formas de retornar ao seu estado original (mineiro de ferro), por isso podemos fazer uma analogia dizendo que o processo de corrosão é exatamente inverso ao processo de metalurgia. No caso das estruturas de concreto armado, com a despassivação das armaduras provocado pela carbonatação do concreto, o ferro (Fe) entra em contato com a H₂O e O₂ e fazendo a corrosão da seguinte forma:



O produto proveniente desta reação química, possui um volume muito maior do que a barra de ferro possuía, desta forma é criada tensões de tração expansivas dentro do próprio concreto. Pelo fato do concreto ser um material de grande resistência a compressão, porém baixa resistência a tração, ocorre ruptura do concreto causando os deslocamentos como observado na figura 12

Figura 12- Deslocamento do concreto devido ao aumento de seção da barra de ferro no processo corrosivo.



2.6. Fatores humanos no meio urbano que prejudica a vida útil das estruturas de concreto armado.

Para análises dos principais fenômenos nos quais ocorrem em meio urbano e que prejudicam a durabilidade das estruturas de concreto, é necessário avaliar o fator humano. Incêndios criminosos, como ilustrado na Figura 13, e o uso indevido dessas estruturas como banheiros públicos são os principais causadores de patologias principalmente nas obras de artes especiais. Após varias visitas em campo, foi constatado que é praticamente em todos haviam resquícios da atividade humana indevida e conseqüentemente, danos a estrutura.

Figura 13- incêndio provocado por moradores de rua no viaduto Sarah Kubitschek

Bombeiros são mobilizados para incêndio debaixo de viaduto na Avenida Pedro II, em BH

Fogo começou na madrugada desta quinta-feira (9).



Fonte: G1 Minas, 2021

No caso dos incêndios, durante o período em que as estruturas de concretos são submetidas a altas temperaturas, suas propriedades físicas e químicas podem ser alteradas, resultando em perda de desempenho e até mesmo ao colapso.

Já no caso do uso das estruturas de concreto como banheiros a céu aberto, além do mau cheiro gerado no local, a urina possui inúmeras substâncias na quais são descartadas pelo nosso organismo, incluindo alguns ácidos como o ácido úrico. Esse ácido na estrutura de concreto, faz com que o Ph do concreto comece a diminuir. À medida que esses ácidos vão penetrando a estrutura de concreto e chegando nas armaduras, faz com que as barras de ferro saiam da zona de imunidade e acabem desencadeando todo o processo de deterioração da estrutura de concreto.

Capítulo 3:

Procedimentos executivos para recuperação de estruturas de concreto armado

Nessa etapa de nossos estudos, mostrar alguns dos processos executivos para recuperação de uma estrutura de concreto. Para exemplificar melhor, realizamos um acompanhamento técnico da recuperação várias obras de arte especial em concreto armado na cidade de Belo Horizonte.

Obras onde se foi realizado o acompanhamento técnico :

| Endereço | Tipo de OAE |
|--|-------------|
| (COMPLEXO LAGOINHA) - Av. Nossa Senhora de Fátima / Rua Pouso Alegre (Sentido Av. Cristiano Machado) - Av. Nossa Senhora de Fátima / Rua Pouso Alegre (Sentido Av. Do Contorno) - Av. Do Contorno / Rua Pouso Alegre / Rua Célio de Castro | Viaduto |
| Viaduto Sarah Kubitschek (Viaduto B) Av. Dom Pedro II / Av. Olegário Maciel e Pç. do Peixe / Rua Do Acre | Viaduto |
| Av. Nossa Senhora de Fátima / Rua José Viola | Passarela |
| Rua Sacadura Cabral - Rua Quilombo - Acesso à Estação Vila Oeste | Passarela |
| LIBERDADE EM EQUILÍBRIO (Praça Rio Branco - Rodoviária) | Monumento |

Capítulo 4:

Inspeção visual

Antes de iniciar a terapia, é necessário realizar uma inspeção visual para cadastramento das anomalias. Observamos que todas as OAE's vistoriadas possuem o mesmo tipo de anomalia encontradas.

Conforme as Figuras 14, 15, 16 e 17, em Inspeção visual realizada na passarela localizada na Rua Jose Viola no bairro Calafate, foram encontradas várias manifestações patológicas na estrutura como armaduras expostas na base do pilar, deslocamento na laje da passarela, deslocamento e fissuras ao longo do pilar além de armadura exposta nas vigas longarinas e transversinas da passarela.

Figura 14- Armaduras expostas na base do pilar



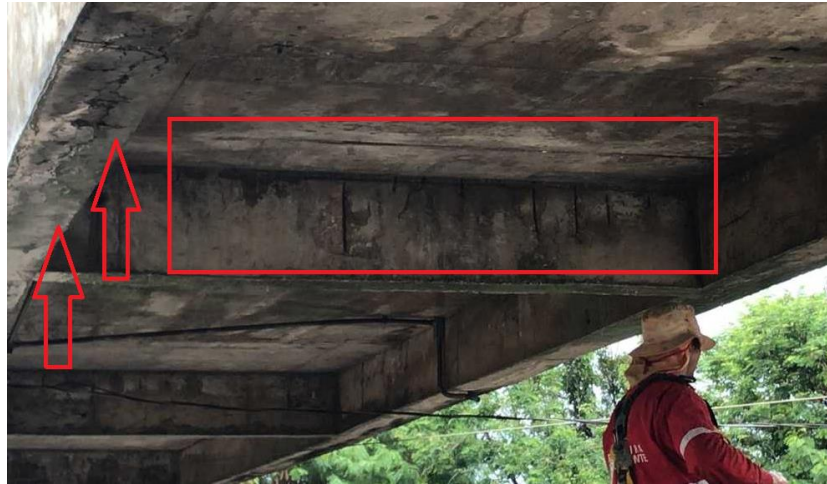
Figura 15- Deslocamento na laje da passarela



Figura 16- Deslocamento e fissuras ao longo do pilar



Figura 17- Ferragem expostas e trincas nas vigas



A inspeção visual, também pode ser acompanhada de um simples teste de repercussão, no qual são realizadas batidas no concreto com auxílio de um martelo ou marreta e em seguida avaliado o som no qual o impacto da ferramenta causa. Caso seja escutado um som “oco”, é bem provável que a armadura já esteja em processo de corrosão, uma vez que significa que o produto da corrosão do ferro já esteja separando o concreto da armadura, mesmo que ainda não seja possível ver visualmente trincas ou deslocamentos naquele ponto.

Capítulo 5:

Limpeza da superfície da estrutura

Após o cadastramento de todas as manifestações patológicas da estrutura, podemos começar nosso processo de recuperação com um hidrojateamento de toda a estrutura. O aconselhável é que sejam utilizadas máquinas de alta pressão (>2000PSI) e que o movimento de lavagem seja realizado de baixo para cima. Importante também que a água utilizada seja limpa, isenta de qualquer contaminante.

Nas Figuras 18 e 19 apresenta-se esse procedimento sendo executado no complexo da Lagoinha e as Figuras 20 e 21 mostram a estrutura localizada na Rua Sacadura Cabral (Passarela de acesso a estação Vila Oeste) antes e depois da lavagem, sendo possível constatar a aparição de novas manifestações patológicas.

Figura 18- Limpeza das vigas do complexo da lagoinha, na entrada do túnel exclusivo para ônibus do túnel da lagoinha



Figura 19- Limpeza das new Jersey do complexo da Lagoinha



Figura 20- Passarela de acesso a estação de metrô Vila Oeste antes da lavagem



Figura 21- Passarela de acesso a estação de metrô Vila Oeste depois da lavagem



É possível observar pelas imagens acima, é provável que seja visível novos pontos de deterioração da estrutura, sendo assim é necessária uma atualização do cadastro de manifestações patológicas após a limpeza total da estrutura.

Capítulo 6:

Remoção do concreto

Feito isso, é necessário que seja removido toda a parte do concreto no qual tenha seja possível visualizar as manifestações patológicas como deslocamento, trincas, rachaduras ou som oco, sempre se atentando ao tamanho das áreas na quais serão abertas, para que elas não sejam demasiadamente grandes. Em caso de pilares, é interessante que não seja aberto mais que um lado por vez. Para orientar melhor o colaborador no qual irá realizar esta tarefa, é interessante que a área a ser aberta seja toda marcada com giz.

Nessa tarefa, para que se tenha um maior rendimento na execução do serviço é interessante que sejam utilizados martelotes de 5 ou 10 kg elétricos. Os martelotes pneumáticos apesar de proporcionarem um maior rendimento na execução, não são recomendados para esse tipo de serviço, uma vez para o seu correto funcionamento é utilizado óleo hidráulico para lubrificar suas engrenagens e esse óleo durante o seu funcionamento tende a espirar em toda a área que está sendo executado o serviço, desta forma posteriormente quando for aplicado uma argamassa de reparo, esse óleo no substrato pode ocasionar uma perda de aderência comprometendo assim todo o processo de recuperação.

Essa etapa, é muito importante pois nela será removido toda o concreto que não oferece mais a estrutura seus devidos desempenhos estipulados em projeto, como resistência a compressão (em caso do concreto deslocado) ou proteção química as armaduras (em caso do concreto aparentemente sadio porem carbonatado).

É necessário também que todo o concreto em volta das armaduras com processo de corrosão instalado seja removido, com pelo menos 15mm na parte de trás. Além que seja encontrado em volta da área de corrosão ao menos 50mm de ferragem sem corrosão. Caso a área fique muito grande, o procedimento de reparo tem que ser feito em 2 ou mais vezes.

Este procedimento deverá ser executado conforme as Figuras 22, 23, 24 e 25.

Figura 22- Escarificação do pilar do viaduto da Lagoinha com uso de martelete 10Kg



Figura 23- Escarificação da estrutura do Monumento na Praça Rio Branco



Figura 24- Escarificação do pilar na passarela da rua Jose Viola

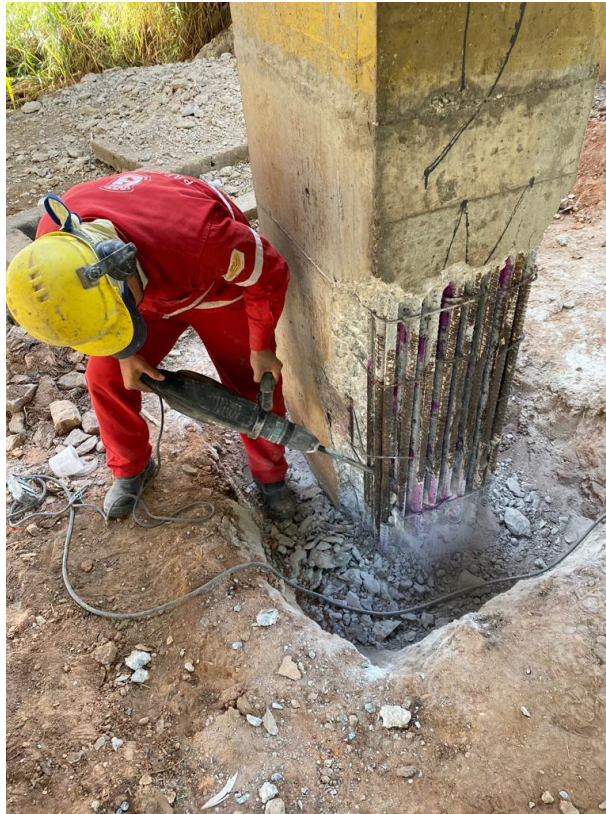


Figura 25- Face do pilar totalmente escarificada da Rua Jose Viola



Capítulo 7:

Ensaio para medição da frente de carbonatação do concreto

Para identificar se toda o concreto carbonatado foi removido, deve ser realizado um teste de Fenolftaleína no concreto. Esse teste é realizado através da aspensão de uma solução de álcool, água e fenolftaleína 1% diluída. Essa solução nada mais é que um indicador de Ph, onde ao entrar em contato com a estrutura de concreto, muda sua coloração conforme a Figura 26:

Figura 26- Classificação do Ph através da coloração do substrato quando submergido a solução de fenolftaleína



Esse procedimento foi executado em todas as obras acompanhadas. Na Figura 27, podemos identificar que até onde o concreto havia sido escarificado ainda não havia sido removido todo o concreto carbonatado e que seria necessário continuar com o procedimento de escarificação do concreto. Já na Figura 28 vemos que todo o concreto carbonatado foi devidamente removido.

Figura 27- Aspersão de fenolftaleína na estrutura do concreto, constatando um Ph abaixo de 8,3

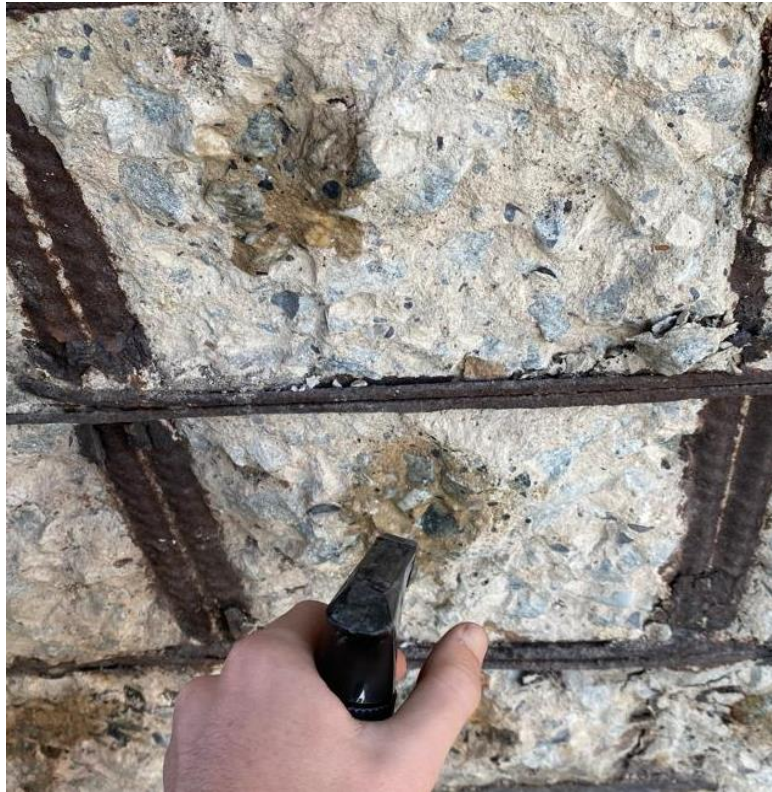


Figura 28- Aspersão de fenolftaleína na estrutura do concreto, constatando um Ph acima de 9,5



Capítulo 8:

Delimitação da área de reparo

Após isso, é interessante que a área seja delimitada com auxílio de serras mármores, para garantir que a argamassa de reparo possua uma espessura mínima adequada conforme as Figuras 29 e 30.

Figura 29- Delimitação da área escarificada no monumento da praça Rio Branco



Figura 30 -Delimitação da área escarificada no pilar da passarela da Rua Jose Viola



Capítulo 9:

Limpeza das armaduras

Após todo o concreto ser removido e as áreas já delimitadas, chegou a hora de realizar um tratamento nas armaduras. O primeiro passo é realizar a remoção de todo o produto da corrosão no qual está em volta do ferro. Esse processo pode ser realizado de duas formas: Jateamento de abrasivos (conforme as Figuras 30 e 31) ou lixamento mecânico (conforme as Figura 32 e 33). Esse processo deve ocorrer até que se atinja um brilho metálico.

Figura 31- Jateamento de abrasivo na armadura do pilar



Figura 32- Armadura parcialmente limpa com uso de abrasivo

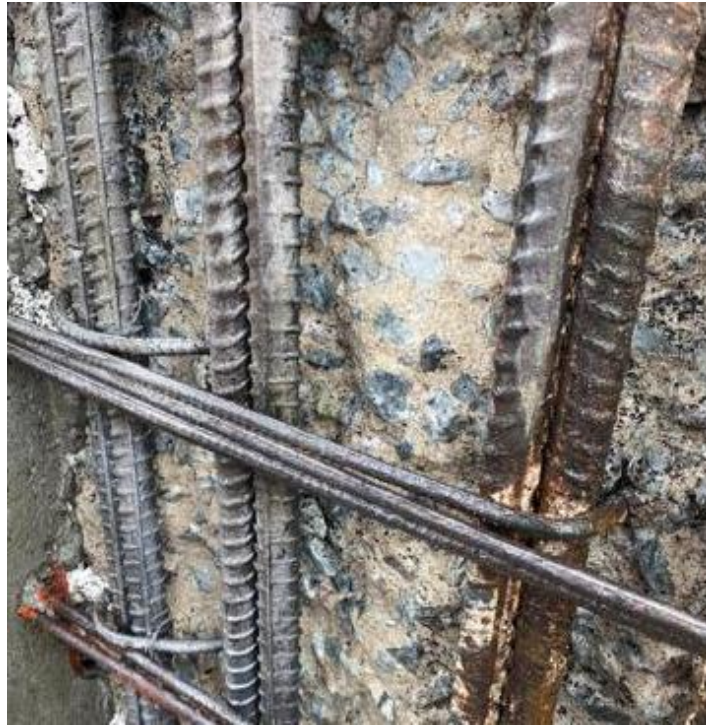


Figura 33- Limpeza das armaduras de forma mecanizada, utilizando lixadeira e furadeira com escovas metálicas



Figura 34 - Armadura lima com uso de escovas metálicas

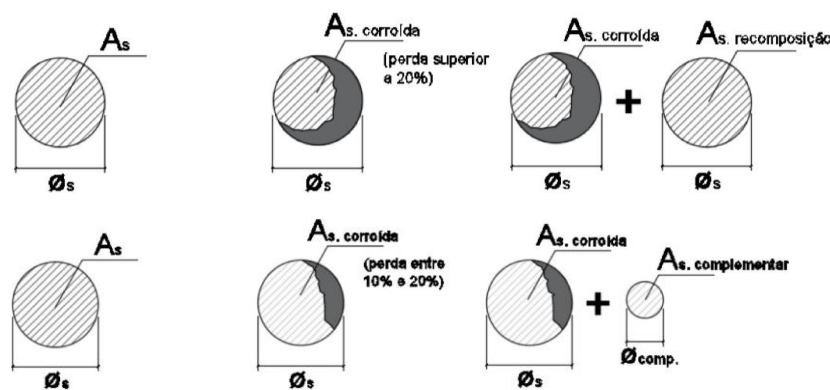


Capítulo 10:

Complemento das Armaduras

Após esse processo, deverá ser avaliada a situação da ferragem sã. Caso seja constatada perda de seção por corrosão superior a 15% de seu diâmetro original ou seccionamento de barras, será procedido a complementação ou substituição das armaduras utilizando-se trespasses, conforme Figura 35 e tabela 1. A escolha da solução mais adequada será realizada no momento da recuperação, avaliando a situação e posição, entre outros fatores. Ressaltando-se que se deve evitar dobramentos excessivos próximos às regiões soldadas e que o limite para emendas por trespasses em uma mesma seção é de 25% das barras.

Figura 35- Perda de seção do aço no processo de corrosão



Fonte: Daniel Veras, p.135. 2017

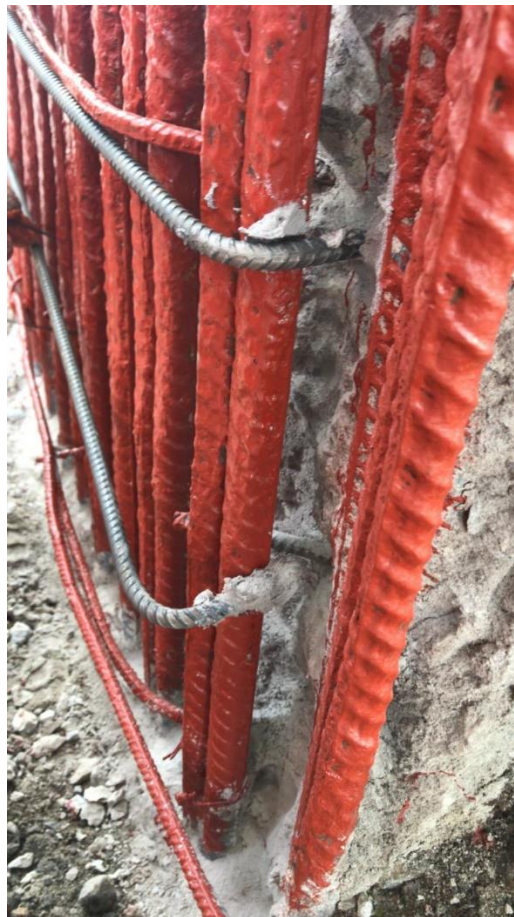
Tabela 1 - Comprimento do trespasses segundo a NBR 6118

| Comprimento de trespasses (L) | | | |
|-------------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Ø armadura | Armadura comprimida | Armadura tracionada | |
| | | 50 % de emendas na mesma seção | 100% de emendas na mesma seção |
| > 12,5 mm | $L \geq 40\phi$ | $L \geq 40\phi$ | $L \geq 60\phi$ |
| $\leq 12,5$ mm | $L \geq 30\phi$ | $L \geq 30\phi$ | $L \geq 45\phi$ |

Fonte: Associação Brasileira de normas técnicas, p.43. 2014

Em caso também, da área aberta não seja suficiente para realizar o transpasse, é necessário que utilizem uma ancoragem química na estrutura a base epóxi. Para isso, é necessário que seja realizados furos no concreto de forma com que a ferragem a ser complementada fique entre os dois furos. Após os furos estarem devidamente limpos (com uso de sopradores) e sem umidade, ele deve ser preenchido com um adesivo estrutura a base epóxi, e com a ferragem já devidamente cortada e dobrada em for de “grampo”, ela deve ser encaixada nos dois furos, ao lado da ferragem que teve sua seção perdida. Depois deve se prender devidamente a ferragem com auxílio de arame para que ela fique perfeitamente posicionada, conforme Figura 37.

Figura 37- Ferragens sendo complementadas com uso de adesivo estrutural



Capítulo 11:

Aplicação de inibidores de corrosão

Com as ferragens devidamente limpas e substituída, chegamos em um momento que causa muita divergência entre os profissionais da área de recuperação estrutural: o uso de inibidores de corrosão.

Esses inibidores podem ser divididos de duas formas: inibidores de corrosão catódicos e inibidores anódicos.

Os inibidores de corrosão anódicos, são compostas por uma argamassa cimentícia fluida, com alto teor de acrílico entre outros aditivos, no qual criará em torno da armadura uma camada passivadora (semelhante a já criada pelo concreto não carbonatado), impedindo com que a corrosão naquele ponto volte a se instalar. No viaduto localizado na Av. Americo Vespúcio foi aplicado esse tipo de inibidor de corrosão, conforme a Figura 38.

Figura 38- Aplicação de inibidores anódicos na estrutura (sikatop 108) no viaduto da Av Americo Vespúcio



Já os inibidores catódicos fornecem uma proteção diferente para armadura (Figura 39). Esses inibidores forçam a estrutura através de pintura ou pastilha aderido a armadura, um outro metal com um potencial de corrosão maior que o Ferro (Fe). Sendo assim, caso venho ocorrer uma corrosão naquela região, o metal adicionado a estrutura (normalmente se utiliza o Zinco) entra em corrosão primeiro que o ferro. Porem, o produto da corrosão do Zinco não possui aumento de volume como no caso do ferro. Desta forma esse tipo de inibidor consegue aumentar a vida útil da estrutura sem causa danos nenhum a ela.

Figura 39- Aplicação de inibidores catódicos na estrutura (cromato de Zinco) do viaduto da Lagoinha



Capítulo 12:

Fechamento de reparos rasos

Uma vez que toda a ferragem já está tratada, é hora de realizar o fechamento do reparo. O material utilizado para isso vai depender da profundidade do reparo. Em caso de fechamentos mais rasos (até 5 cm aproximadamente) o recomendado seria um uso de uma argamassa polimérica.

Essa argamassa deve ser pré dosada pelo fabricante, contendo retração compensada, isenta de cloreto e deve atingir as resistências a compressão de 17Mpa com 3 dias e 30Mpa com 28 dias, além de obter uma aderência ao substrato de 1Mpa. Também é muito importante que se siga todas as instruções do fabricante.

Esse Material pode ser aplicado de duas formas: Manualmente e por projeção.

Em caso da área a ser reparada seja pequena, o ideal é que essa aplicação seja aplicada manualmente. É importante que a primeira camada seja feita com muito cuidado, para que a argamassa preencha todos os espaços, principalmente atrás da ferragem (Figura 40). Nas camadas mais externas pode ser aplicada com o auxílio de uma colher de pedreiro (Figura 42) ou desempenadeira (Figura 43), mas sempre pressionando bastante a argamassa para que não haja espaço vazios.

Outra forma de aplicação é através de projeção (Figura 41), importante notar que na própria ficha técnica do produto já prevê uma adição de água maior para esse tipo de situação. Essa água a mais é importante para que a argamassa passe mais facilmente pela tubulação do equipamento além de ajudar que ela preencha os espaços melhor. O compressor utilizado no equipamento deve ter a capacidade superior a 100 Pcm, menos que isso ocorrem muitos desperdícios, devido ao fato da argamassa não conseguir um impacto necessário ao substrato para ter uma boa fixação.

Figura 40- Aplicação de argamassa polimérica manualmente



Figura 41- Aplicação de argamassa polimérica por projeção



Figura 42- Aplicação de argamassa com auxílio de colher de pedreiro



Figura 43- Acabamento do reparo



Em casos de fechamentos mais profundos, é interessante que se utilizem argamassas com as mesmas características técnicas, porém ao invés de tixotropia, deve ser fluida. Microconcreto é um excelente material para ser utilizado nessas situações, porém para sua aplicação deve ser utilizado formas metálicas ou de madeirites plastificados, conforme as Figuras 44 e 45.

Figura 44- Montagem de forma no local do reparo mais profundo



Figura 45- Preenchimento da forma com microconcreto



Capítulo 13:

Cura da área de reparo

É importante que antes da aplicação da argamassa polimérica ou do microconcreto o substrato esteja convenientemente limpo e também saturado. Fazemos isso molhando a estrutura com água, e depois esperamos alguns minutos até que o concreto perca a aparência de encharcado. Esse processo influencia muito na aderência final da argamassa de reparo com o substrato.

Após secagem do reparo, deve ser realizada uma cura do material com água limpa por pelo menos 7 dias, conforme a Figura 46. Esse processo faz com que não ocorra o escape da água da argamassa de forma prematura, ocasionando as fissuras por retração. Outra técnica simples e muito eficiente é envolver o local do reparo com uma manta geotêxtil (Figura 47) e manter ela úmida por esse mesmo período.

Figura 46- Cura do reparo com aspersão de água



Figura 47- Cura do local de reparo com uso de manta geotêxtil úmida



Capítulo 14:

Pintura da estrutura

Após a estrutura reparada, é interessante que seja aplicada uma tinta acrílica. A tinta, além do efeito estético, é muito importante pois ela ajuda a selar a porosidade da estrutura. Ela deve ser aplicada através de rolos de lã (conforme Figura 48) ou máquinas de pintura airless (conforme Figura 49)

Figura 48- Pintura da estrutura com utilização de rolo de lã



Figura 49- Pintura da estrutura com utilização de máquina de pintura Airless



Capítulo 15:

Considerações finais

Em todas as OAE's acompanhadas, foi-se acrescentado na base de todos os pilares um aumento no recobrimento da ferragem. Por ser uma região onde há uma umidade maior, e como já vimos anteriormente sofre mais com ações humanas como fogo e urina, essa região tende a ser mais suscetível a degradação. Por isso em todas as situações essa técnica foi implementada.

Observou-se que ao final de todos esses processos de recuperação, os processos no quais as estruturas sofriam de diminuição do desempenho original foram reduzidas drasticamente. Uma vez que todo o produto de corrosão no qual se formava em meio ao concreto ocasionando trincas e deslocamento do concreto foi removido e substituído por novas barras de aço devidamente fixadas, além de ser implementado sistemas para que essa corrosão demore mais a ocorrer novamente.

Outro ponto fundamental conquistado com essa sequência de trabalhos foi a remoção de toda o concreto carbonatado e substituição do mesmo por produtos mais resistentes e com uma alcalinidade muito maior, além de que naqueles pontos onde foi-se realizado o reparo, a entrada de agentes agressivos a estrutura será muito menor devido à baixa permeabilidade das argamassas aplicadas.

Antes e Depois da recuperação na Passarela da Rua José Viola

Figura 50- Antes das Intervenções



Figura 51- Depois das intervenções



Capítulo 16:

Referencias

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118:2014: Projetos de estruturas de Concreto Armado. 3. Rio de Janeiro, 2014

FREIRE, K.R.R. Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto.1.Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2005

HELENE, Paulo. Corrosão em armadura para concreto armado. 3. São Paulo: Pini, 1986

LUIZ, Jeferson. Patologias das edificações. 1. Ed Fortaleza: Leund, 2020

MISURELLI, Hugo; MASSUDA, Clovis. Paredes de Concreto. Revista TÉCNICA, São Paulo, v.17, n. 147, p. 74-80, 2009.

NEVILLE, A. M. tecnologia do concreto. 2. Ed. Bookman, 2013

PEREIRA, E; SILVA, I. J; COSTA, M. R. M. M. Avaliação dos mecanismos de aderência entre argamassa colante e substrato não poroso. Ambiente Construído, v. 13, n. 2, p. 139- 149. Porto Alegre, 2013.

PETIT, J-Y.; WIRQUIN, E. Evaluation of various cellulose ethers performance in ceramic tile adhesive mortars. International Journal of Adhesion and Adhesives, v. 40, p. 202-209, 2013

PIANCASTELLI, E.M – Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto Armado – Ed. Depto. Estruturas da EEUFMG – 1997 -160p.

POURBAIX. Lectures on electrochemical corrosion, plenum press, 1973: p.235-295

RIBEIRO, Carmem Couto. Materiais de Construção Civil. 4. Ed. Belo Horizonte: UFMG, 2013.

SANTOS, P.; JULIO, E.; SILVA, V. Correlation between concrete-to-concrete bond strength and the roughness of the substrate surface. Construction and Building Materials, v. 21, n. 8, p. 1688-1695, 2007

TAHA, M. M. R., SHRIVE, N. G. The use of pozzolans to improve bond and bond strength. In: Canadian Masonry Symposium, 9th, Fredericton. Department of Civil Engineering – University of New Brunswick, 2001

THOMAS, Ercio. Trincas em edifícios. 1.ed. São Paulo: Leud, 2019

VERAS, Daniel. Princípios da ciência dos materiais cimentícios: produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos. 1. Ed. Fortaleza: Appris, 2013

VERAS, Daniel. Corrosão e Degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2. Ed. Fortaleza: LTC, 2019