



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**



**VICTOR CÉSAR CARDOSO BATISTA**

**DIAGNÓSTICO E PROPOSTAS DE TERAPIAS PARA  
MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM RESERVATÓRIOS  
ELEVADOS DE CONCRETO ARMADO: UM ESTUDO DE CASO NA  
ZONA URBANA DE ARACAJU**

São Cristóvão - SE

2023

VICTOR CÉSAR CARDOSO BATISTA

**DIAGNÓSTICO E PROPOSTAS DE TERAPIAS PARA  
MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM RESERVATÓRIOS  
ELEVADOS DE CONCRETO ARMADO: UM ESTUDO DE CASO NA  
ZONA URBANA DE ARACAJU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe (UFS) como requisito para o título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof. MSc. Sandra Carla L. Cardoso

São Cristóvão - SE

2023

VICTOR CÉSAR CARDOSO BATISTA

**DIAGNÓSTICO E PROPOSTAS DE TERAPIAS PARA  
MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM RESERVATÓRIOS  
ELEVADOS DE CONCRETO ARMADO: UM ESTUDO DE CASO NA  
ZONA URBANA DE ARACAJU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe (UFS) como requisito para o título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 21 de julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Sandra Carla L. Cardoso Nota 10,0

Prof<sup>a</sup>. MSc. Sandra Carla L. Cardoso – DEC/UFS (Orientadora)

Emerson Figueiredo Dos Santos Nota 10,0

Prof. Dr. Emerson Figueiredo Dos Santos – DEC/UFS (1º Examinador)

Monalisa Matisse Barreto Oliveira Nota 10,0

Eng<sup>a</sup>. Monalisa Matisse Barreto Oliveira – (2º Examinador)

São Cristóvão - SE

2023

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por todas as bênçãos que tenho recebido e por sempre me guiar durante toda essa jornada.

Aos meus pais, Antônio e Maria, sou imensamente grato por terem construído valores sólidos que moldaram minha formação, pelo incentivo e atenção, e por todo o investimento em minha educação ao longo dos anos.

Ao meu irmão, Júlio César, por sua amizade e por ser uma fonte de motivação.

À minha namorada, Alessandra, por todo incentivo, cuidado e companheirismo.

Aos meus amigos de curso, por compartilharem essa jornada acadêmica comigo, repleta de conhecimento, experiências e momentos de diversão. Em especial a Antônio Manoel, Gabriel Andrade, Giovanna, Ícaro e Roberta Teodoro.

À minha orientadora, Prof. MSc. Sandra Carla, por toda atenção e assistência no desenvolvimento deste trabalho. Além de ser uma professora dedicada, você foi um exemplo de simpatia e empatia.

Aos meus amigos da CODEVASF, por sempre me acolherem e pelas palavras de incentivo.

À MM Engenharia Diagnóstica, por ter proporcionado a valiosa oportunidade de aprendizado e ter disponibilizado os equipamentos utilizados neste trabalho.

## RESUMO

Os reservatórios elevados de água construídos em concreto armado, que desempenham um papel crucial na sociedade, estão sujeitos a deterioração no ambiente que estão inseridos, apresentando manifestações patológicas. Diante disso, foi realizado um estudo de caso que tem como objetivo identificar, analisar e propor soluções para as manifestações patológicas existentes em três reservatórios cilíndricos construídos em concreto armado na zona urbana de Aracaju. Para alcançar os objetivos do trabalho, foram realizadas visitas aos reservatórios e o diagnóstico foi realizado por meio de inspeção visual, registro fotográfico e ensaios não destrutivos. Fissuras, corrosão de armaduras, deslocamento do concreto, carbonatação, presença de cloretos, lixiviação e eflorescência foram identificadas como manifestações patológicas. Esses problemas foram causados por erros de projeto, execução e manutenção. Além de causar impacto visual e receio quanto ao uso, estas anomalias podem também diminuir a vida útil da estrutura, comprometendo sua funcionalidade e colocando em risco a segurança de pessoas e estruturas próximas. Os resultados mostraram que essas manifestações, mesmo em graus diferentes, estão presentes nos reservatórios estudados. Ao fim das inspeções, depreende-se que os reservatórios apresentados necessitam de procedimentos de recuperação e reparo. Sendo necessário realizar o preparo e limpeza geral da estrutura, incluindo a remoção do concreto fragilizado e a limpeza das barras de aço por escovamento ou, se necessário, a sua substituição devido ao grau de corrosão. Além disso, é necessário realizar o fechamento das fissuras por injeção e a aplicação de novo sistema de impermeabilização das cubas. Ademais, conclui-se que a metodologia desenvolvida no trabalho possibilita obter dados relevantes sobre as características internas e externas das estruturas.

**Palavras-chave:** concreto armado; inspeção visual; ensaios não destrutivos, manifestações patológicas; reservatórios de concreto; vida útil.

## ABSTRACT

Elevated water reservoirs constructed with reinforced concrete, which play a crucial role in society, are susceptible to deterioration in their surrounding environment, resulting in pathological manifestations. In response to this issue, a case study was conducted with the objective of identifying, analyzing, and proposing solutions for existing pathological manifestations in three cylindrical reinforced concrete reservoirs located in the urban area of Aracaju. To achieve the objectives of this study, site visits were conducted to the reservoirs, and the diagnosis was performed through visual inspections, photographic documentation, and non-destructive testing. Pathological manifestations such as fissures, reinforcement corrosion, concrete displacement, carbonation, presence of chlorides, leaching, and efflorescence were identified. These problems were caused by design, execution and maintenance errors. In addition to causing visual impact and concerns regarding usage, these anomalies can also decrease the structure's service life, compromise its functionality, and pose risks to the safety of nearby individuals and structures. The results showed that these manifestations, albeit at varying degrees, were present in the studied reservoirs. Upon completion of the inspections, it is inferred that the presented reservoirs require recovery and repair procedures. It is necessary to carry out the preparation and general cleaning of the structure, including the removal of weakened concrete and the cleaning of steel bars by brushing or, if necessary, their replacement due to the degree of corrosion. Additionally, it is essential to perform fissure closure by injection and apply a new waterproofing system to the tanks. Furthermore, it is concluded that the methodology developed in this study enables obtaining relevant data regarding the internal and external characteristics of the structure.

**Keywords:** reinforced concrete; non-destructive tests; pathological manifestations; reservoirs; useful life.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Origem dos problemas patológicos com relação às etapas de produção e uso das obras civis.....	17
Figura 2: Causas intrínsecas aos processos de deterioração de estruturas de concreto .....	19
Figura 3: Causas extrínsecas aos processos de deterioração de estruturas de concreto .....	20
Figura 4: Manifestações patológicas encontradas por Tinoco e Moraes. ....	21
Figura 5: Transmissão direta .....	36
Figura 6: Transmissão indireta .....	36
Figura 7: Exemplo de gráfico obtido pela transmissão indireta .....	37
Figura 8: Transmissão semidireta.....	37
Figura 9: Exemplo de esclerômetro e funcionamento. ....	39
Figura 10: Área de ensaio e pontos de impacto.....	40
Figura 11: Metodologia desenvolvida no trabalho .....	45
Figura 12: Pacômetro da Proceq.....	47
Figura 13: Exemplo de malha das armaduras detectadas por meio da pacometria .....	47
Figura 14: Pacômetro em utilização. ....	48
Figura 15: Equipamento de ultrassom utilizado.....	49
Figura 16: Gel condutor utilizado.....	49
Figura 17: Reticulado para o ensaio de esclerometria.....	50
Figura 18: Marcação da área de estudo .....	51
Figura 19: Execução do furo no local em estudo .....	52
Figura 20: Aspersão de fenolftaleína na área de estudo .....	53
Figura 21: Divisão da área de estudo, para aplicação de nitrato de prata e fenolftaleína.....	54
Figura 22: Fissura presente no pilar, reservatório 1. ....	55
Figura 23: Fissura presente na laje de cobertura, reservatório 1. ....	56
Figura 24: Fissura e iminente deslocamento do concreto, reservatório 2.....	56
Figura 25: Fissura presente na laje de cobertura, reservatório 3. ....	57
Figura 26: Fissura presente na laje de fundo da cuba, reservatório 3.....	57

Figura 27: Deslocamento do concreto e armadura exposta, reservatório 1. ....	58
Figura 28: Deslocamento do concreto e armadura exposta, reservatório 2. ....	58
Figura 29: Iminente deslocamento do concreto, reservatório 3. ....	59
Figura 30: Abertura na parede de concreto e armadura exposta, reservatório 2. ....	59
Figura 31: Processo de corrosão em armadura exposta, reservatório 1. ....	60
Figura 32: Processo de corrosão em armadura exposta, reservatório 1. ....	60
Figura 33: Processo de corrosão em armadura exposta, reservatório 2. ....	61
Figura 34: Processo de corrosão em armadura exposta próximo a laje de cobertura, reservatório 3. ....	61
Figura 35: Processo de corrosão em armadura exposta na parede de concreto, reservatório 3. ....	62
Figura 36: Pontos de infiltração e eflorescência, reservatório 1. ....	63
Figura 37: Pontos de infiltração e eflorescência, reservatório 1. ....	63
Figura 38: Pontos de infiltração e eflorescência, na região da cuba, reservatório 2. ....	64
Figura 39: Pontos de umidade, localizados na laje de fundo da cuba, reservatório 2. ....	64
Figura 40: Pontos de infiltração e eflorescência entre emendas da forma, reservatório 2. ....	65
Figura 41: Pontos de eflorescências na laje de fundo da cuba, em proximidades de tubulação, reservatório 2. ....	66
Figura 42 Pontos de eflorescências na laje de fundo da cuba, reservatório 3. ....	66
Figura 43: Pontos de infiltração na laje de fundo da cuba, reservatório 3. ....	67
Figura 44: Escarificação ou apicoamento manual. ....	70
Figura 45: Escarificação ou apicoamento mecânico. ....	70
Figura 46: Lixamento manual. ....	71
Figura 47: Lixamento elétrico. ....	71
Figura 48: Escovamento manual. ....	72
Figura 49: Limpeza com jato de água fria. ....	72
Figura 50: Limpeza com jato de água fria. ....	73

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Análise percentual das causas de problemas patológicos em estruturas de concreto. .....	17
Quadro 2: Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal .....	22
Quadro 3: Tipos de fissuras nas estruturas .....	27
Quadro 4: Valores limite de fissuras .....	29
Quadro 5: natureza química das eflorescências.....	31
Quadro 6: Critério de velocidade para classificação da qualidade do concreto .....	35
Quadro 7- Indicadores de pH para identificação da carbonatação do concreto. ....	41
Quadro 8: Critérios da ASTM para probabilidade de corrosão do aço no concreto. ....	43

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio
Cl-	Cloretos
CO <sub>2</sub>	Gás Carbônico
END's	Ensaio não destrutivo
MPa	Mega Pascal
pH	Potencial Hidrogeniônico

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
2.1. Objetivo geral .....	14
2.2. Objetivos específicos .....	14
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>15</b>
3.1. Vida útil e durabilidade.....	15
3.2. Manifestações patológicas .....	16
3.2.1. Corrosão das armaduras .....	22
3.2.2. Carbonatação .....	23
3.2.3. Cloretos.....	25
3.2.4. Fissuras .....	26
3.2.5. Deslocamento do concreto.....	29
3.2.6. Lixiviação e eflorescência .....	30
3.3. Ensaio não destrutivo.....	32
3.3.1. Inspeção visual e fotográfica .....	33
3.3.2. Pacometria .....	33
3.3.3. Ultrassom.....	34
3.3.4. Esclerometria .....	38
3.3.5. Espessura da frente de carbonatação .....	40
3.3.6. Profundidade da penetração de cloretos .....	42
3.3.7. Potencial de corrosão.....	42
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>44</b>
4.1. Objeto de estudo e descrição dos Reservatórios .....	45
4.2. Aplicação dos ensaios .....	46
4.2.1. Inspeção visual e fotográfica .....	46
4.2.2. Pacometria .....	46

4.2.3.	Ultrassom.....	48
4.2.4.	Esclerometria .....	50
4.2.5.	Espessura da frente de carbonatação .....	51
4.2.6.	Espessura de presença de cloretos .....	53
4.2.7.	Potencial de corrosão.....	54
<b>5.</b>	<b>INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DO ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>55</b>
5.1.	Diagnóstico da inspeção visual.....	55
5.2.	Resultado dos ensaios .....	67
5.2.1.	Pacometria.....	67
5.2.2.	Ultrassom .....	68
5.2.3.	Esclerometria.....	68
5.2.4.	Espessura da frente de carbonatação.....	68
5.2.5.	Presença de cloretos .....	68
5.2.6.	Potencial de corrosão .....	69
5.3.	Sugestão de correções .....	69
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>76</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil, devido às suas características de resistência, durabilidade e capacidade de ser moldado no formato desejado, podendo ser utilizado na execução de pilares retangulares ou circulares, vigas e paredes de concreto, nas dimensões calculadas e necessárias. No entanto, com o passar do tempo, diversos fatores podem influenciar negativamente na sua durabilidade e vida útil, levando a manifestações patológicas que comprometem a segurança e a estética das estruturas. Por isso, é fundamental conhecer as técnicas que possam avaliar e monitorar a condição das estruturas de concreto armado e de desenvolver o diagnóstico de suas manifestações patológicas, a fim de garantir sua durabilidade e segurança.

Dentre as diversas estruturas que podem ser executadas em concreto armado estão os reservatórios, em destaque os elevados. São estruturas construídas com o objetivo de armazenar água, seja para distribuição, uso local ou para situações de emergência, como incêndios. Assim como as outras estruturas executadas em concreto armado, os reservatórios estão sujeitos a deterioração no ambiente em que está inserido.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo de caso em três reservatórios elevados com o intuito de identificar, analisar e propor soluções para as manifestações patológicas presentes, a partir do roteiro metodológico a ser apresentado.

Este trabalho é desenvolvido em 6 capítulos, de maneira que no Capítulo 1, é a introdução, explicitando o contexto em estudo e estrutura do trabalho.

No Capítulo 2, estão os objetivos gerais e específicos que motivaram este trabalho.

No Capítulo 3, será desenvolvida uma revisão de literatura, inicialmente sobre a durabilidade e vida útil do concreto, incluindo as principais definições e diferenças. Após isso, serão descritas as principais manifestações patológicas que podem ocorrer na estrutura em estudo, explicando os princípios físicos, químicos e suas causas. Também será abordado o uso de ensaios não destrutivos para avaliação da condição dos reservatórios, incluindo suas vantagens, limitações e princípios.

No Capítulo 4, será explicitada a metodologia utilizada para realização dos ensaios e do trabalho em geral. Será apresentado o objeto de estudo, bem como as técnicas de ensaios não destrutivos empregadas para avaliar sua condição. Será apresentado de maneira sucinta os procedimentos e equipamentos utilizados para realização dos ensaios.

No Capítulo 5, serão apresentados os resultados e discussões dos dados obtidos durante os ensaios. Serão apresentadas as manifestações patológicas identificadas, as características internas das estruturas frente aos ensaios não destrutivos e apresentada sugestões de terapias para manifestações patológicas apresentadas.

Ademais, no Capítulo 6, serão apresentadas as conclusões do estudo, incluindo as principais contribuições para o conhecimento na área, bem como as limitações e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, que este trabalho possa contribuir para o avanço do conhecimento sobre inspeções em reservatórios elevados, sobre as manifestações patológicas e os ensaios não destrutivos utilizados para avaliação dessas estruturas e estruturas de concreto armado em geral.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Este estudo tem como objetivo identificar, analisar e propor soluções para as manifestações patológicas presentes em três reservatórios construídos em concreto armado na zona urbana de Aracaju-SE, e durante o estudo de caso apresentar uma sequência metodológica para realizar uma inspeção em reservatórios elevados, contribuindo para futuros empreendimentos similares e inspeções em obras civis de modo geral.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Realizar visitas ao local de cada reservatório para avaliar as manifestações patológicas presentes através de uma inspeção visual inicial com registros fotográficos;
- Fazer uma revisão geral da literatura sobre os tipos de manifestações patológicas encontradas nos reservatórios estudados;
- Identificar as principais causas das manifestações patológicas encontradas e explicar o seu mecanismo de ocorrência fazendo diagnóstico preliminar;
- Observar as mudanças nas características internas dos elementos estruturais por meio dos ensaios não destrutivos;
- Recomendar sugestões de terapias para as manifestações patológicas identificadas.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1. Vida útil e durabilidade

A durabilidade e a vida útil de estruturas de concreto armado são temas amplamente discutidos na literatura técnica e científica. É essencial garantir que as estruturas sejam projetadas, construídas e mantidas para resistir às condições operacionais a que estão expostas, evitando assim a sua deterioração precoce. Normas regulamentadoras, como a NBR 15575:2021 e a NBR 6118:2014, fornecem orientações sobre a escolha adequada de materiais, execução de serviços, controle de qualidade, manutenção e inspeção, contribuindo para a garantia da durabilidade e vida útil das estruturas de concreto.

Apesar de ambos os termos se referirem à capacidade de uma estrutura de resistir à deterioração e permanecer em uso durante um período de tempo esperado, existem algumas diferenças conceituais entre eles. Segundo Alexander, Bentur e Mindess (2017), a “durabilidade é a capacidade de um material ou estrutura resistir às condições de serviço para as quais foi projetado durante um período prolongado sem deterioração inaceitável”. Em concordância, a NBR 6118:2014 explica que a durabilidade consiste na “capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”. Além disso, a NBR 15575-1:2021 complementa que a durabilidade é “a capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas no manual de uso, operação e manutenção”.

Portanto, a durabilidade é uma característica qualitativa e está relacionada à capacidade da estrutura e os sistemas que a compõem de resistir aos efeitos degradativos causados por diversos fatores, tais como a exposição a ambientes agressivos, ações mecânicas e uso. A durabilidade pode ser afetada pela qualidade dos materiais e do projeto, a execução adequada das etapas construtivas e a realização da manutenção adequada ao longo do tempo. Por fim, determinar a durabilidade de uma estrutura envolve uma avaliação subjetiva baseada na capacidade de manter suas funções e características originais por um período adequado. Isso requer observação cuidadosa e uma análise qualitativa da estrutura em questão (NBR 15575-1, 2021; NBR 6118, 2014; SOUZA; RIPPER, 1998).

Com relação à vida útil, a NBR 15575-1:2021 define que “a vida útil (*service life*) é uma medida temporal da durabilidade de um edifício ou de suas partes (sistemas complexos, do

próprio sistema e de suas partes: sistemas, elementos e componentes)”, ou seja, enquanto a durabilidade é uma característica qualitativa, a vida útil é quantitativa e mede por quanto tempo uma estrutura pode ser usada com segurança e eficácia.

É importante ressaltar que as manifestações patológicas oriundas de erros de projeto, execução, uso ou manutenção podem ocasionar a deterioração antecipada da estrutura e diminuir a sua vida útil, comprometendo sua funcionalidade (DOMICIANO; BARBOSA, 2020).

### **3.2. Manifestações patológicas**

O concreto e o concreto armado são amplamente utilizados na construção civil, principalmente em estruturas de edifícios, pontes, reservatórios e outras obras civis. No entanto, ao longo do tempo, pode haver manifestações patológicas que afetam a resistência e a durabilidade das estruturas.

A NBR 15575-1: 2021 de maneira direta define manifestação patológica como sendo uma “irregularidade 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”.

Então, uma manifestação patológica pode ser definida como qualquer alteração indesejável, anomalia ou defeito que ocorre em uma estrutura de concreto armado ou em um elemento da estrutura, como uma parede de concreto, viga, laje ou pilar, que afeta sua funcionalidade, resistência ou vida útil.

As manifestações patológicas podem ter origem na fase de concepção, execução ou utilização da estrutura (SOUZA; RIPPER, 1998). O Quadro 1, apresenta causas e etapas do surgimento das manifestações.

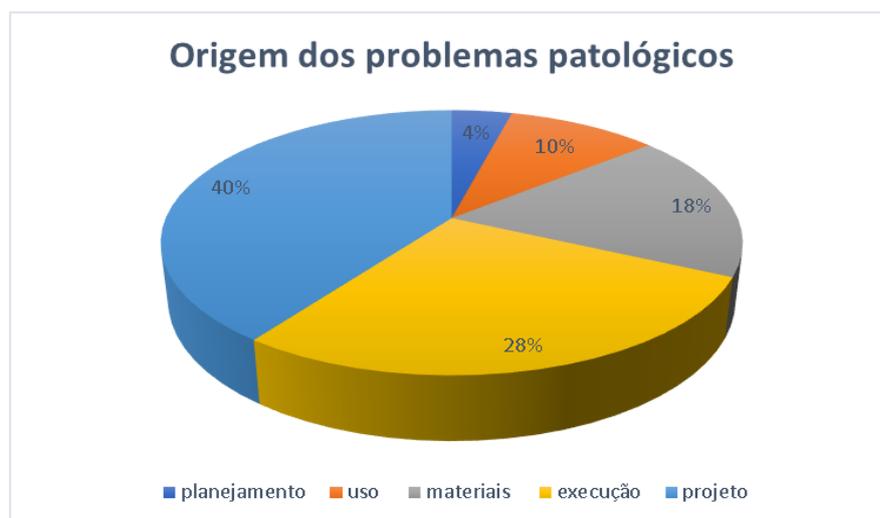
**Quadro 1: Análise percentual das causas de problemas patológicos em estruturas de concreto.**

FONTE DE PESQUISA	CAUSAS DOS PROBLEMAS PATOLÓGICOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO			
	Concepção e Projeto	Materiais	Execução	Utilização e Outras
Edward Grunau Paulo Helene (1992)	44	18	28	10
D. E. Allen (Canadá) (1979)	55	⇐ 49 ⇒		
C.S.T.C. (Bélgica) Verçoza (1991)	46	15	22	17
C.E.B. Boletim 157 (1982)	50	⇐ 40 ⇒		10
Faculdade de Engenharia da Fundação Armando Álvares Penteadó Verçoza (1991)	18	6	52	24
B.R.E.A.S. (Reino Unido) (1972)	58	12	35	11
Bureau Securitas (1972)	⇐ 88 ⇒			12
E.N.R. (U.S.A.) (1968 - 1978)	9	6	75	10
S.I.A. (Suíça) (1979)	46		44	10
Dov Kaminetzky (1991)	51	⇐ 40 ⇒		16
Jean Blévoit (França) (1974)	35		65	
L.E.M.I.T. (Venezuela) (1965-1975)	19	5	57	19

Fonte: Souza e Ripper (1998).

Em concordância com o quadro, a figura a seguir apresenta em porcentagem em quais etapas surgem as patologias:

**Figura 1: Origem dos problemas patológicos com relação às etapas de produção e uso das obras civis.**

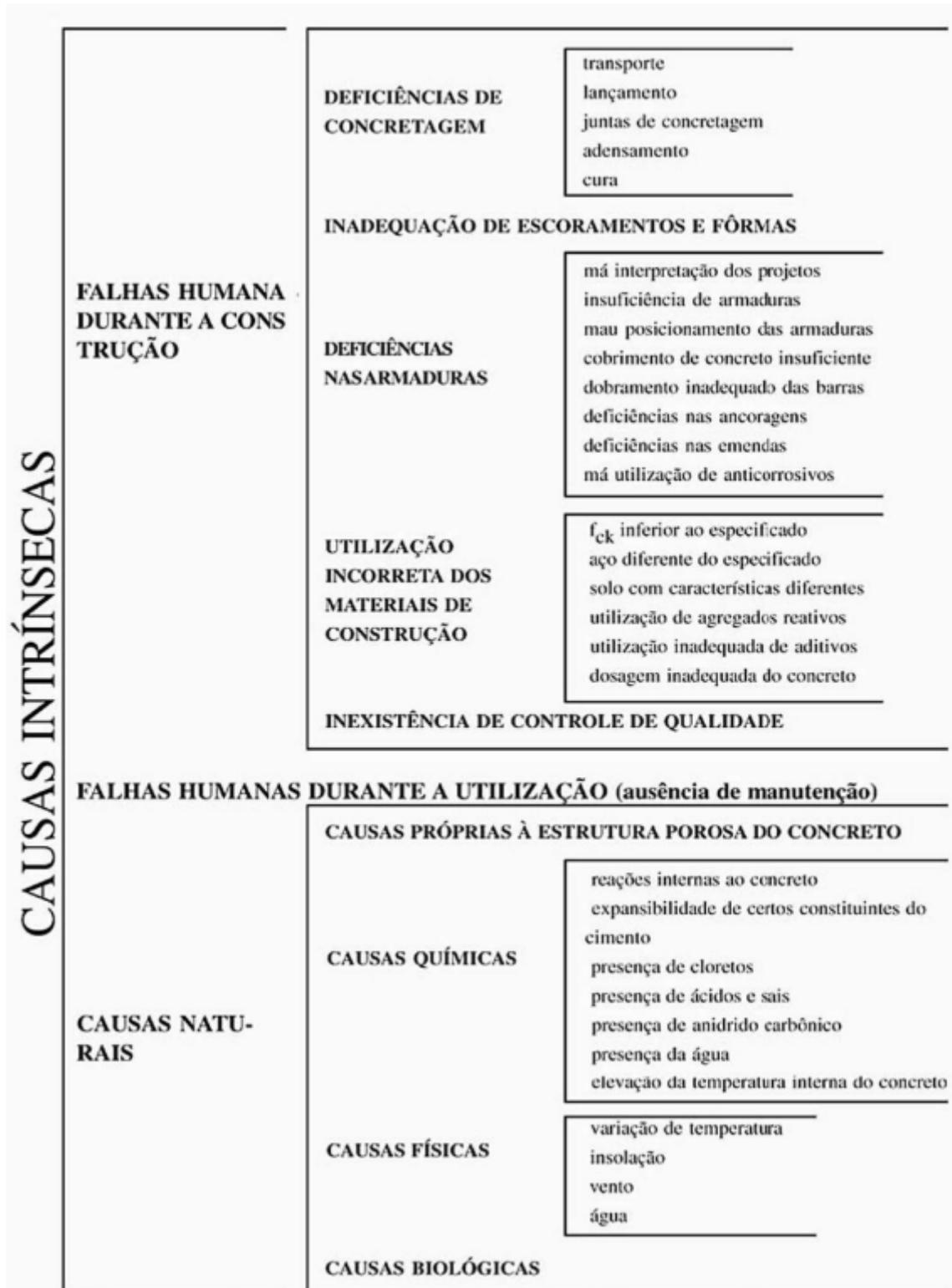


Fonte: Adaptado de Helene (2003).

É possível observar que tanto no quadro de Souza e Ripper (1998) quanto os dados apresentados por Helene (2003) as etapas de projeto e execução apresentam os maiores índices.

Além de compreender as fases em que as manifestações patológicas surgem, é necessário estudar as causas desses problemas. De acordo com a definição de Souza e Ripper (1998), as anomalias são classificadas em dois tipos de causas: intrínsecas e extrínsecas. As causas intrínsecas referem-se a problemas originados nos materiais e peças estruturais durante as fases de execução e/ou utilização da estrutura, podendo ser causadas por falhas humanas, questões relacionadas ao material de concreto ou por ações externas. Podem ser citados como exemplos de causas intrínsecas: deficiências na concretagem, falta de cobrimento, reações internas do concreto, falta de controle de qualidade, entre outras (SOUZA; RIPPER, 1998). A Figura 2 apresenta as causas intrínsecas no processo de deterioração das estruturas.

Figura 2: Causas intrínsecas aos processos de deterioração de estruturas de concreto.

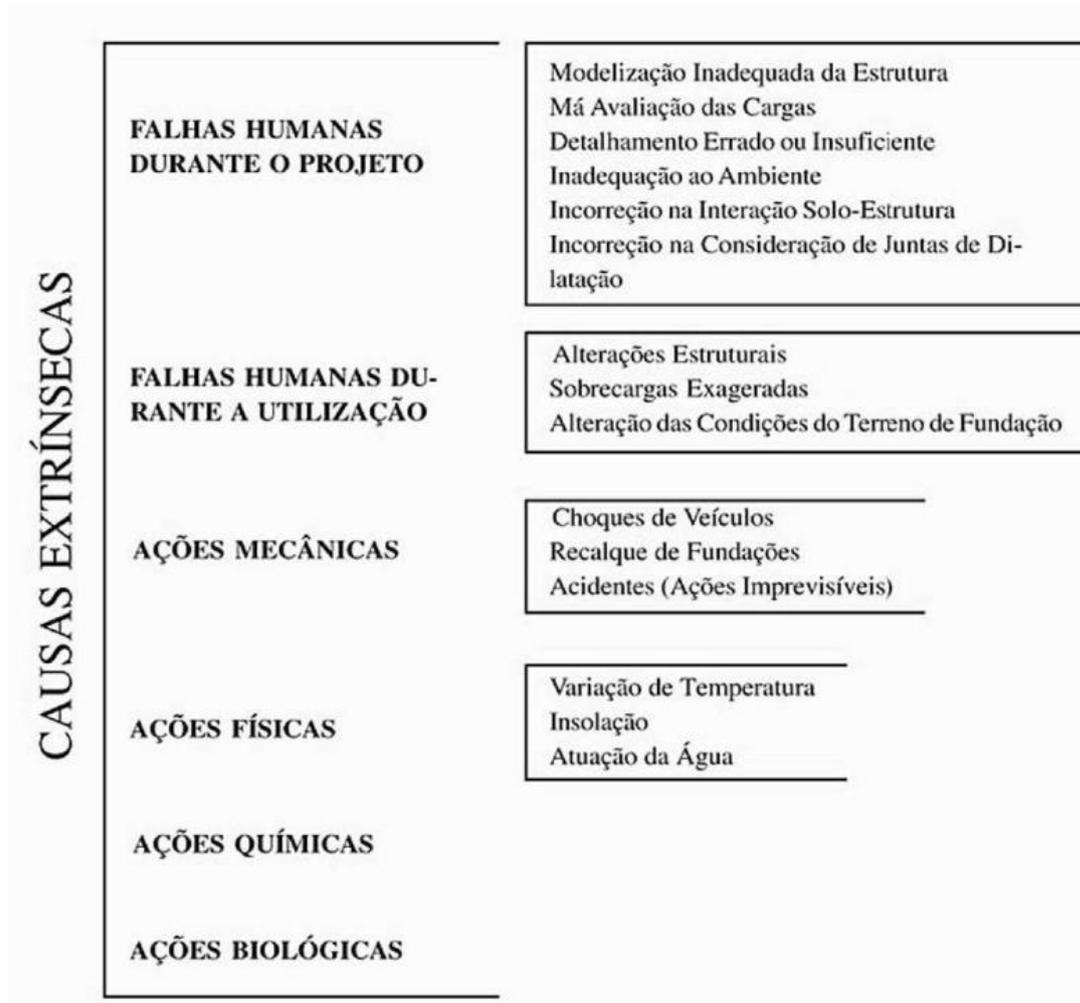


Fonte: Souza e Ripper (1998).

Por outro lado, de acordo com Souza e Ripper (1998), as causas extrínsecas referem-se às falhas que atacam a estrutura "de fora para dentro", ou seja, que não dependem do corpo da

estrutura em si ou de sua composição interna. Exemplos de causas extrínsecas incluem mudanças quanto ao uso das estruturas, agentes químicos, acidentes, execução de outras estruturas que comprometam resistência do solo, entre outros fatores que possam afetar a estrutura a partir do meio externo (SOUZA; RIPPER, 1998).). A Figura 3 apresenta as causas extrínsecas no processo de deterioração das estruturas.

**Figura 3: Causas extrínsecas aos processos de deterioração de estruturas de concreto**

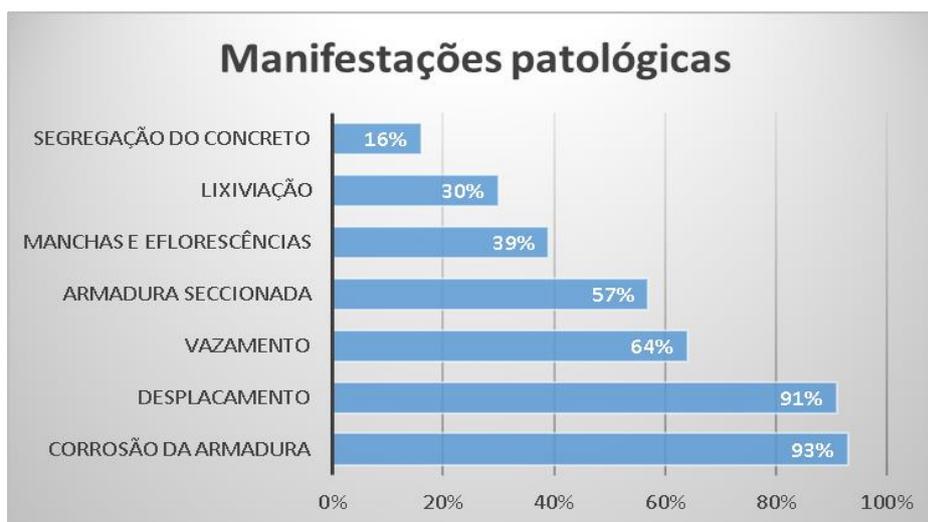


Fonte: Souza e Ripper (1998).

Na literatura técnica e acadêmica, vários estudos foram conduzidos para analisar a durabilidade e as principais manifestações patológicas em reservatórios de concreto armado. Em um estudo realizado por Tinoco e Morais (2013) no estado do Rio Grande do Norte, 45 reservatórios de diferentes capacidades, idades e exposições ambientais foram inspecionados através de análises visuais e ensaios. Durante a inspeção, foram observados vários problemas do tipo: fissuras, deslocamentos, corrosão das armaduras e vazamentos. Esses problemas foram relacionados principalmente à qualidade dos materiais utilizados, execução inadequada

das etapas construtivas e falta de manutenção preventiva. Os resultados obtidos destacaram que 93% dos casos apresentavam corrosão da armadura, 91% apresentavam deslocamento do concreto, 64% apresentavam vazamento e 57% apresentavam armadura seccionada. Outros problemas observados incluíram manchas e eflorescências (39%), lixiviação (30%) e segregação do concreto (16%).

**Figura 4: Manifestações patológicas encontradas por Tinoco e Morais.**



**Fonte: Adaptado de Tinoco e Morais (2023).**

Além disso, em um estudo elaborado por Borges (2008), foi realizada uma busca no sistema de uma empresa especializada e escolhidos como estudo de caso 3 reservatórios elevados em concreto armado que já haviam sido recuperados. Foi observado que todos os reservatórios apresentaram corrosão, carbonatação e fissuras. Dois deles apresentaram umidade e apenas um apresentou estalactites e instabilidade estrutural.

A partir dos trabalhos descritos, percebe-se que algumas manifestações patológicas incidentes em estruturas de concreto armado, em especial reservatórios, são: fissuração, corrosão de armaduras, eflorescências, carbonatação, presença de cloreto, deslocamento do concreto e também a presença de umidade. É importante destacar que essas manifestações patológicas podem comprometer a segurança e a durabilidade das estruturas.

Portanto, a revisão de literatura feita neste trabalho teve como foco as principais manifestações patológicas apresentadas no parágrafo anterior que, por concordância, foram as mesmas encontradas nesse estudo de caso.

### 3.2.1. Corrosão das armaduras

A corrosão das armaduras é um processo eletroquímico que ocorre devido à interação entre uma estrutura e seu meio ambiente, também chamada de interação destrutiva. No interior do concreto, em situações ideais, a armadura apresenta proteção contra a corrosão. O concreto, por ser um meio alcalino e apresentar uma determinada espessura, oferece uma proteção natural às barras. Além disso, as barras de aço são passivadas por um filme de óxido de ferro que protege contra agentes agressivos. No entanto, é válido destacar que em certas condições adversas a película passiva é destruída e também ocorre de a alcalinidade do concreto ser reduzida. A carbonatação e ação agressiva dos íons cloreto são os principais responsáveis pela iniciação do processo de corrosão da armadura, subtópicos desenvolvidos nos itens 3.2.2 e 3.3.3 (CASCUDO, 1997).

A NBR 6118:2014 estabelece a importância do cobrimento adequado das armaduras como medida de proteção. O cobrimento é a distância entre a superfície do concreto e a superfície da armadura, devendo ser suficiente para proteger ou buscar minimizar o contato da armadura do meio corrosivo presente. A norma supracitada recomenda valores mínimos de cobrimento para cada tipo de elemento estrutural e classe de agressividade, levando em consideração fatores como a umidade relativa do ar, a presença de gases corrosivos e a exposição à água do mar.

**Quadro 2: Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal.**

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV <sup>c</sup>
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje <sup>b</sup>	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo <sup>d</sup>	30		40	50
Concreto protendido <sup>a</sup>	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

Fonte: NBR 6118 (2014).

A corrosão da armadura pode ocasionar diversos problemas, como a redução da seção transversal do aço e a diminuição da aderência entre o concreto e a armadura. Além disso, a corrosão das armaduras pode gerar expansão volumétrica do aço, o que pode provocar a

formação de fissuras e deslocamentos. Nesse contexto, a corrosão da armadura pode reduzir a resistência da estrutura e ocasionar o seu colapso (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Por fim, é necessário realizar a inspeção periódica na estrutura, com o intuito detectar e corrigir possíveis problemas de corrosão na armadura. A avaliação pode ser realizada por meio de técnicas de ensaios não destrutivos ou parcialmente destrutivos, como a medição da frente carbonatação do concreto, presença de cloretos e a medição do potencial de corrosão. A partir dos resultados desses ensaios é possível avaliar a situação do material.

### **3.2.2. Carbonatação**

A carbonatação é um fenômeno que ocorre em estruturas de concreto expostas ao ar. Esse processo é causado pela reação química entre o anidrido carbônico ( $\text{CO}_2$ ) presente na atmosfera e os componentes do cimento, que resulta na formação de ácido carbônico e posteriormente carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), este aumenta a dureza superficial do concreto. Segundo Neville (2016) a ação do  $\text{CO}_2$  ocorre mesmo com pequenas concentrações, a exemplo em ambiente rural, onde o teor de dióxido de carbono é cerca de 0,03%, em volume. Embora seja um processo natural, a carbonatação é um problema comum que pode comprometer a durabilidade e a resistência do concreto, levando à corrosão das armaduras e, conseqüentemente, a danos estruturais (HELENE, 1993).

De acordo com Souza e Ripper (1998), o  $\text{CO}_2$  presente na atmosfera é transportado através das fissuras e poros para dentro da estrutura, reagindo com o hidróxido de cálcio, o que faz com que o pH do concreto reduza a valores abaixo de 9, diminuindo a sua alcalinidade. Durante a formação do carbonato de cálcio e com a redução da alcalinidade do material, a proteção natural das armaduras contra a corrosão é afetada. Com o tempo, a corrosão das armaduras pode levar à perda de resistência mecânica do concreto e, eventualmente, à sua degradação acelerada.

Além disso, a carbonatação começa na superfície exposta e avança em direção ao interior da estrutura, sendo um processo que se desenvolve lentamente ao longo do tempo. Sabe-se que a velocidade de carbonatação pode oscilar entre 1 e 3 mm por ano, de acordo com Silva (1995).

Existem diversos fatores que influenciam na carbonatação e na sua velocidade, tais como a porosidade do concreto, a umidade, a temperatura e a concentração de dióxido de carbono no ar. De acordo com Papadakis, Fardis e Vayenas (1992), a evolução dos processos de carbonatação do concreto com o tempo depende dos parâmetros de composição do concreto e

das condições ambientais. O grau de saturação dos poros também é um fator de controle para a carbonatação, uma vez que a água bloqueia os poros e reduz a difusão de  $\text{CO}_2$ . Por outro lado, a água proporciona um meio para que o  $\text{CO}_2$  se difunda, conforme explicado por Neville (2016). Caso os poros na pasta de cimento hidratada estejam preenchidos com água, essa difusão é um processo lento. Se, por outro lado, a água nos poros for insuficiente, o  $\text{CO}_2$  permanece na forma gasosa e não reage com o cimento hidratado.

Observações de campo e modelos matemáticos, segundo Papadakis, Fardis e Vayenas (1992), mostram que a carbonatação é máxima em umidades relativas em torno de 50%. Em complemento, Neville (2016) argumenta que a maior taxa de carbonatação ocorre em umidades relativas entre 50 e 70%. É importante destacar que a taxa de carbonatação pode variar dependendo da composição do concreto e das condições ambientais, portanto, é necessário considerar todos esses fatores ao estudar a carbonatação do concreto.

Pela forma como a carbonatação se insere, o concreto apresenta uma frente de carbonatação, geralmente expressa em mm ou cm. Essa interface apresenta duas regiões de pH muito distintas, uma de baixa alcalinidade com pH próximo a 8 e outra com pH elevado próximo a 13 que não apresenta carbonatação (HELENE; CUNHA, 2001).

Apesar de poder comprometer a durabilidade da estrutura, a carbonatação não é totalmente um problema para o concreto, pois, segundo Souza e Ripper (1998), a carbonatação aumenta as resistências mecânicas e químicas do concreto, desde que esteja restrita a uma espessura inferior à da camada de cobrimento, ou seja, desde que não alcance a armadura. Porém, para uma estrutura totalmente exposta, se o meio apresentar alta concentração de  $\text{CO}_2$  e o concreto apresentar porosidade e fissuração, a carbonatação se espalhará profundamente na estrutura, podendo atingir a armadura.

Portanto, é necessário determinar o quanto a frente de carbonatação penetrou no concreto. Para isso, podem ser utilizadas técnicas visuais com auxílio da aspensão de substâncias que indiquem mudança de pH, como por exemplo, soluções de fenolftaleína ou timolftaleína, que apresentam mudança de coloração em pH entre 8,3 e 10 e entre 9,3 e 10,5, respectivamente (HELENE; CUNHA, 2001).

De acordo com a norma técnica NBR 6118 (ABNT, 2014), para prevenir a carbonatação do concreto, é necessário tomar medidas que impeçam a penetração de agentes agressivos em sua estrutura interna. É recomendável utilizar um cobrimento adequado nas armaduras e controlar a fissuração para minimizar esse efeito, além de optar por um concreto de baixa

porosidade. Logo, a aplicação de revestimentos protetores nas superfícies expostas do concreto pode proteger o material contra a penetração do dióxido de carbono e prolongar a vida útil da estrutura. Além disso, a adição de aditivos impermeabilizantes no concreto durante a sua produção é uma medida protetora, pois esses aditivos podem diminuir a porosidade, protegendo o material contra a penetração do CO<sub>2</sub>.

### **3.2.3. Cloretos**

Os cloretos (Cl<sup>-</sup>) são um dos principais causadores de corrosão das armaduras nas estruturas de concreto armado. Este fenômeno ocorre quando íons cloreto chegam à superfície do aço e reagem com ele, destruindo a película passivadora da armadura e provocando sua corrosão, mesmo que o pH do concreto esteja elevado. Como resultado, a armadura enfraquece e pode perder sua capacidade estrutural, comprometendo a segurança da estrutura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A contaminação por cloretos pode ocorrer pela falta de controle de qualidade do material utilizado na fabricação do concreto, ou seja, pode advir da água de amassamento contaminada com sais, uso de aditivos a base de cloreto de cálcio e por conta de agregados contaminados. Portanto, essa forma de contaminação é dita como incorporada ao concreto, por ser oriunda da fase de preparação do material (CASCUDO, 1997).

Outra forma de contaminação é o contato com o ambiente agressivo e acontece de fora para dentro. Assim como na carbonatação, o cloreto fica disperso no ar e penetra no material por conta da porosidade, essa forma de contaminação ocorre com maior intensidade nas obras próximas a ambientes marítimos, pois sofre alta incidência de ventos úmidos e névoas com a presença de íons cloretos que, por sua vez, podem penetrar nas estruturas de concreto e despassivar a armadura (CASCUDO, 1997).

Para evitar o ataque por cloretos, é necessário adotar medidas preventivas, como utilizar concreto com baixa porosidade, adicionar material pozolânico ao cimento, não utilizar aditivos à base de cloreto de cálcio, adotar o cobrimento necessário para armadura em relação ao ambiente que está inserida e realizar o controle tecnológico no material que será utilizado na composição do concreto. Além disso, é importante realizar uma manutenção preventiva e periódica, executando ensaios para detectar a presença de cloretos no interior das estruturas e reparar qualquer tipo de problema antes que ele se agrave (NBR 6118, 2014).

### 3.2.4. Fissuras

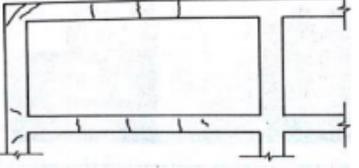
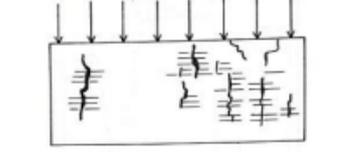
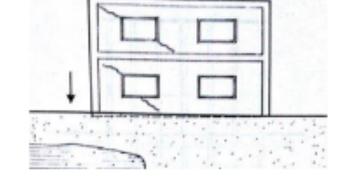
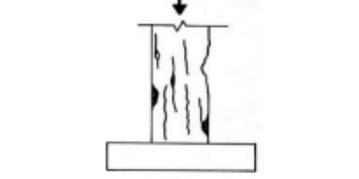
As fissuras são um problema bastante recorrente em estruturas de concreto, apesar disso precisam ser investigadas se comprometem o uso e a segurança dos usuários das estruturas. Além de questões estéticas elas podem comprometer a integridade estrutural, permitindo a entrada facilitada de agentes agressivos como a água e os gases, que podem danificar os componentes da estrutura e originar novas manifestações patológicas como eflorescência e carbonatação (SOUZA; RIPPER, 1998).

As fissuras são classificadas em ativas ou passivas. As ativas são aquelas que, com o passar do tempo, existe uma variação no valor da abertura, mostrando que a causa responsável ou uma nova manifestação patológica ainda atua sobre a estrutura; enquanto as passivas, a causa foi cessada e por conta disso, se for realizado um acompanhamento da fissuração, ela irá apresentar abertura constante ao longo do tempo (NBR 15575-2, 2013; SOUZA; RIPPER, 1998).

Além disso, as fissuras desenvolvem-se nas estruturas porque as tensões existentes excedem e ou excederam à capacidade resistente do material em determinado momento, sendo um indicativo de que um elemento da estrutura não está funcionando adequadamente, podendo surgir devido a diversas causas, tais como carregamento excessivo, retração do concreto, perda de aderência das barras no concreto, movimentações das formas e escoras, erros de projeto e execução, entre outras (SOUZA; RIPPER, 1998).

Devido à diversidade de formas sobre como as fissuras podem surgir, alguns autores as dividem de acordo com suas causas, como mostrado no quadro abaixo:

Quadro 3: Tipos de fissuras nas estruturas.

Causa da Fissura	Ocorrência em função de:	Exemplo
Movimentação térmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- juntas de materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica;</li> <li>- exposição de elementos a diferentes solicitações térmicas naturais;</li> <li>- gradiente de temperaturas ao longo de um mesmo componente.</li> </ul>	 <p>PAREDE 2</p>
Movimentação Higroscópica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- alto teor de umidade causa expansão do material;</li> <li>- baixo teor de umidade causa retração.</li> </ul>	
Atuação de Sobrecarga	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sobrecarga superior à prevista em projeto</li> </ul>	
Recalques de Fundação	<ul style="list-style-type: none"> <li>- tipo e estado do solo;</li> <li>- disposição do lençol freático;</li> <li>- intensidade da carga, tipo da fundação;</li> <li>- interferência de fundações vizinhas.</li> </ul>	
Alteração química dos materiais	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hidratação retardada de cales;</li> <li>- ataque por sulfatos;</li> <li>- corrosão de armaduras;</li> </ul>	

Fonte: Thomaz (2002), adaptado por Santana (2017).

As fissuras ocorridas pela corrosão da armadura se desenvolvem pela expansão volumétrica, que pode representar um aumento de até dez vezes o volume inicial da barra de aço, essas fissuras se dispõem na direção paralela à barra corroída e, são classificadas como fissuras ativas progressivas por aumentarem a abertura à medida em que os agentes agressivos vão adentrando na estrutura e acelerando o processo de corrosão; logo, a causa do problema ainda está atuando na estrutura (BORGES; 2008; SOUZA; RIPPER, 1998).

Ao analisar a literatura técnica e acadêmica, que inclui livros, artigos científicos e normas técnicas, é possível constatar que não existe uma unanimidade quanto às definições de fissura,

trinca, rachaduras e fendas. A exemplo, pode-se citar as definições de acordo com Saliba e Carvalho Júnior (2019):

- Fissura: é uma abertura em forma de linha que aparece na superfície da estrutura, com espessura de até 0,5mm;
- Trinca: é uma abertura em forma de linha, com espessura de 0,5mm até 1,0mm;
- Rachadura é uma abertura expressiva, proveniente de evidente ruptura de massa, cuja espessura varia de 1,0mm a 1,5mm;
- Fenda é uma abertura excessiva, e sua espessura é superior a 1,5mm.

Além disso, os autores supracitados afirmam que de maneira simplificada, é possível chamar todas as aberturas de trincas, identificando apenas o tamanho da abertura.

A NBR 6118:2014 é responsável por estabelecer diretrizes e critérios para o dimensionamento de estruturas de concreto armado e destaca aspectos importantes no que diz respeito aos limites de fissuração do concreto, representados pela simbologia  $W_k$ . Esses limites são determinados de acordo com o tipo de concreto utilizado e a classe de agressividade a que a estrutura está exposta.

É importante ressaltar que a fissuração do concreto pode comprometer a durabilidade e a segurança da estrutura, além de afetar sua aparência estética. Por isso, a NBR 6118:2014 estabelece valores máximos permitidos para a abertura de fissuras, de modo a garantir o desempenho adequado da estrutura ao longo do tempo.

Quadro 4: Valores limite de fissuras

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	–
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D <sup>a</sup>	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D <sup>a</sup>	Combinação frequente

Fonte: NBR 6118 (2014).

### 3.2.5. Deslocamento do concreto

O deslocamento do concreto é uma patologia que ocorre quando a camada superficial do concreto ou cobrimento se solta da camada subjacente, perdendo o monolitismo da estrutura de concreto. Isso pode proporcionar um contato maior dos agentes agressivos com a estrutura interna, resultando em danos ainda maiores.

A principal causa desse problema é a corrosão e conseqüente fissuração, manifestação que pode levar à expansão volumétrica da armadura em até dez vezes o seu volume original. Essa expansão gera tensões de tração na ordem de 15 MPa dentro do concreto, ocasionando fissuras que favorecem ainda mais a entrada de agentes agressivos, acelerando a oxidação e levando ao deslocamento do concreto. Com o deslocamento, a armadura fica exposta, agravando ainda mais o quadro corrosivo (FIORITI et al, 2017; SOUZA; RIPPER, 1998).

O deslocamento do concreto é, portanto, uma evolução do quadro de corrosão e fissuração que aumenta a exposição da estrutura ao meio ambiente, umidade e CO<sub>2</sub>, desencadeando o fenômeno da carbonatação do concreto e outros agentes corrosivos.

### 3.2.6. Lixiviação e eflorescência

Para o aparecimento da eflorescência é necessário que anteriormente ocorra a lixiviação, pois esse é o mecanismo que além de dissolver, carrega os compostos hidratados da pasta de cimento para a superfície (NBR 6118, 2014).

Além de afetar a aparência dos materiais pelo aparecimento da eflorescência, a lixiviação também pode comprometer sua integridade estrutural, pois o arraste do hidróxido de cálcio, que acaba por diminuir o pH do concreto, pode contribuir para a corrosão do material (SOUZA; RIPPER, 1998).

A eflorescência é um fenômeno físico-químico que consiste no aparecimento de manchas superficiais pelo depósito de sais oriundos do processo de lixiviação, principalmente sais alcalinos e alcalino-terrosos. As manchas são formadas por sais solúveis presentes nos materiais, que, ao entrarem em contato com a água, se dissolvem e, pelo processo de lixiviação, são transportados para a superfície da estrutura, onde a água evapora abandonando os sais solúveis que são depositados por cristalização, formando uma crosta na superfície. Esses sais solúveis são normalmente cloretos, sulfatos ou carbonatos de sódio, potássio, cálcio e magnésio, e podem ser originados de diversas fontes, incluindo o próprio material utilizado na construção ou da água utilizada. (UEMOTO, 1988; BAUER, 1997).

Segundo Bauer (1997), as inflorescências surgem quando há a combinação de três fatores: a presença de sais solúveis, que normalmente estão presentes nos materiais utilizados em uma construção; a presença de água para dissolver esses sais; e a existência de uma pressão hidrostática que permita que a solução migre para a superfície do material. Esses três fatores juntos causam a deposição de sais solúveis na superfície do material.

**Quadro 5: natureza química das eflorescências.**

Composição Química	Fonte Provável	Solubilidade em água
Carbonato de Cálcio	Carbonatação de cal lixiviada da argamassa ou concreto e de argamassa de cal não carbonatada	Pouco solúvel
Carbonato de Magnésio	Carbonatação de cal lixiviada de argamassa de cal não carbonatada	Pouco solúvel
Carbonato de Potássio	Carbonatação dos hidróxidos alcalinos de cimentos com elevado teor de álcalis	Muito solúvel
Carbonato de Sódio	Carbonatação dos hidróxidos alcalinos de cimentos com elevado teor de álcalis	Muito solúvel
Hidróxido de Cálcio	Cal liberada na hidratação do cimento	Solúvel
Sulfato de Cálcio Desidratado	Hidratação do sulfato de cálcio do tijolo	Parcialmente solúvel
Sulfato de Magnésio	Tijolo, água de amassamento	Solúvel
Sulfato de Cálcio	Tijolo, água de amassamento	Parcialmente solúvel

Composição Química	Fonte Provável	Solubilidade em água
Sulfato de Potássio	Reação tijolo-cimento, agregados, água de amassamento	Muito solúvel

Sulfato de Sódio	Reação tijolo-cimento, agregados, água de amassamento	Muito solúvel
Cloreto de Cálcio	Limpeza com ácido muriático Água de amassamento	Muito solúvel
Cloreto de Magnésio	Água de amassamento	Muito solúvel
Nitrato de Potássio	Solo adubado ou contaminado	Muito solúvel
Nitrato de Sódio	Solo adubado ou contaminado	Muito solúvel
Nitrato de Amônia	Solo adubado ou contaminado	Muito solúvel
Cloreto de Alumínio	Limpeza com ácido muriático	Solúvel
Cloreto de Ferro	Limpeza com ácido muriático	Solúvel

**Fonte: Bauer (1997).**

Ao analisar o Quadro 5, que apresenta as possíveis fontes dos sais, fica evidente que muitos desses são intrínsecos aos materiais de construção utilizados em reservatórios de concreto, o que ressalta a importância do controle de qualidade. Além disso, como é necessário

que esses sais sejam solubilizados em água, é essencial proteger a estrutura contra a umidade, por meio do controle de fissuração, através do uso de um sistema de impermeabilização e evitando uma porosidade elevada do material que permita a entrada de água e lixiviação (BAUER, 1997; NBR 6118, 2014).

### **3.3. Ensaios não destrutivos**

Os ensaios não destrutivos (ENDs) são técnicas importantes para a manutenção adequada e segurança das estruturas de concreto armado. Essas técnicas de inspeção são amplamente utilizadas para detectar de forma rápida patologias nas estruturas antes que elas se tornem problemas graves.

Os ensaios permitem avaliar a integridade de um material ou estrutura sem causar danos significativos ao local testado. Em alguns casos, eles podem causar apenas pequenos danos que não afetam a resistência do elemento em questão, tornando-os mecanismos seguros na realização da inspeção. A partir desses ensaios, é possível avaliar a qualidade do concreto quanto a porosidade e presença de vazios, avaliar a dureza superficial do material, determinar a localização das barras e estimar seu diâmetro e cobrimento, entre outras informações. Esses ensaios são utilizados em estruturas novas para monitorar a evolução da resistência e avaliar a qualidade do concreto, bem como em estruturas antigas para avaliar sua integridade e capacidade de resistir a solicitações (EVANGELISTA, 2002).

Existem diversos ensaios não destrutivos utilizados na avaliação de estruturas de concreto, entre eles destaca-se a inspeção visual, a pacometria, a esclerometria, a ultrassonografia, a profundidade da frente de carbonatação e o potencial de corrosão. O ensaio de profundidade da frente de carbonatação executado por indicador de pH, de forma mais específica pode ser descrito como um ensaio parcialmente destrutivo.

Nos capítulos seguintes, serão apresentados esses ensaios e sua aplicação na avaliação da integridade estrutural do concreto, possibilitando a identificação de eventuais manifestações patológicas, além de fornecer informações para a tomada de decisão em relação à manutenção e reparo das estruturas.

### **3.3.1. Inspeção visual e fotográfica**

A inspeção visual e fotográfica também pode ser considerada um ensaio não destrutivo e é uma técnica fundamental na avaliação da condição de estruturas de concreto armado. Essa técnica permite identificar e registrar sinais de deterioração, tais como trincas, deslocamentos, eflorescências, deformações, corrosão, entre outros. A importância da inspeção visual e fotográfica reside no fato de que esses sinais podem indicar problemas que comprometem a segurança e a durabilidade da estrutura (HELENE, 1993; NORONHA, 2018).

Embora possa identificar falhas superficiais, não é capaz de avaliar a estrutura interna do concreto, onde podem ocorrer problemas como vazios, falta de homogeneidade, carbonatação, entre outros. Além disso, a inspeção visual pode ser limitada em casos em que a aparência superficial da estrutura não reflete sua real condição. Portanto, é importante utilizar outras técnicas de avaliação, como testes não destrutivos, para obter uma avaliação mais completa e precisa da condição das estruturas de concreto armado (ACI, 1998).

Em resumo, a inspeção visual e fotográfica é uma técnica essencial na avaliação da condição de estruturas de concreto armado, mas não deve ser o único parâmetro a ser utilizado em uma inspeção final.

### **3.3.2. Pacometria**

A pacometria é um ensaio não destrutivo que consiste em um equipamento eletrônico portátil chamado "pacômetro" ou medidor de cobrimento que funciona por indução magnética. Esse método se baseia no princípio em que a presença do aço afeta o campo magnético de um eletroímã, permitindo encontrar e estimar o cobrimento e o diâmetro das barras de aço presentes na estrutura. Essa técnica é muito útil em situações em que é necessária uma intervenção estrutural e não há projetos disponíveis, podendo partir de estimativas. Além disso, a determinação da localização das barras de aço é uma informação muito importante para o ensaio esclerométrico e de ultrassom (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Para realizar o ensaio de pacometria, é necessário verificar sempre o manual fornecido pelo fabricante para questões de uso, calibração e possíveis interferências que possam ocorrer. Em geral, o procedimento consiste em posicionar o equipamento sobre a superfície da estrutura onde se deseja encontrar e identificar a barra de aço. O equipamento deve ser movido no sentido perpendicular à direção das barras procuradas, fazendo ida e volta lentamente. Quando o

aparelho detecta uma barra de aço, ele emite um alerta sonoro, e o círculo presente no visor digital do aparelho fica centralizado.

Em relação à eficiência do ensaio de pacometria, um estudo realizado por Andrade (2017) teve como objetivo avaliar a precisão de diferentes pacômetros. Para isso, foram utilizados três pacômetros de marcas distintas: o da Hilti, o da Proceq e o da Controls. Em seu experimento, foram analisadas barras de diâmetros 8mm, 10mm, 12,5mm e 16mm em um protótipo de concreto armado, a fim de encontrar a armadura e determinar o diâmetro e cobrimento das mesmas.

Apesar de não terem sido obtidos resultados totalmente satisfatórios, Andrade (2017) concluiu que o pacômetro pode ser utilizado para localização da armadura, embora sua precisão em relação ao diâmetro e cobrimento seja limitada. Dentre os pacômetros testados, o modelo da Proceq apresentou os melhores resultados.

Cabe ressaltar que, mesmo com a utilização de um pacômetro considerado preciso, é importante que o equipamento seja sempre utilizado de acordo com as instruções do fabricante, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados obtidos.

Em resumo, a pacometria é uma técnica simples e eficiente para a localização de barras de aço em estruturas. É uma ferramenta que pode ser utilizada em combinação com outros dados para a realização de intervenções estruturais, e auxilia na realização de outros ensaios não-destrutivos, visto que em ensaios de ultrassonografia e esclerometria, não é aconselhável realizar onde há barras de aço, o que geraria interferências nos resultados e relatórios equivocados.

### **3.3.3. Ultrassom**

Ensaio não destrutivo que permite verificar a estrutura interna do concreto, a partir dele é possível avaliar a homogeneidade, detectar possíveis falhas, descontinuidade e fissuras, além de também mapear a qualidade do concreto e a evolução das suas propriedades (ANDREUCCI, 2014; EVANGELISTA, 2002).

O ensaio de ultrassom consiste na verificação da velocidade de propagação de um pulso medido entre dois pontos do concreto. A instrumentação utilizada para o ensaio inclui transdutores de emissão e recepção, bem como um pulsador e um temporizador eletrônico. Além disso, para garantir o acoplamento consistente dos transdutores em todos os pontos de teste é necessário aplicar um gel condutor. Com base na medição do tempo de viagem em

função da distância entre o transmissor e o receptor é medida a velocidade média de propagação da onda (EVANGELISTA, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 2008; NBR 8802; 2019).

A velocidade de propagação das ondas depende da densidade e das propriedades elásticas do concreto. Assim, determinando a velocidade da onda em diferentes locais de uma estrutura, é possível fazer uma análise sobre a uniformidade dessas características. Sendo que quanto maior a velocidade de propagação do pulso ultrassônico maior será a qualidade do concreto (EVANGELISTA, 2002; PATIL et al., 2019).

A qualidade do concreto pode ser relacionada com a velocidade de pulso ultrassônico de acordo com o Quadro 6.

**Quadro 6: Critério de velocidade para classificação da qualidade do concreto.**

Qualidade do concreto	Velocidade do pulso ultrassônico (m/s)
Excelente	>4500
Boa	3500-4500
Duvidosa	3000-3500
Baixa	2000-3000
Muito baixa	<2000

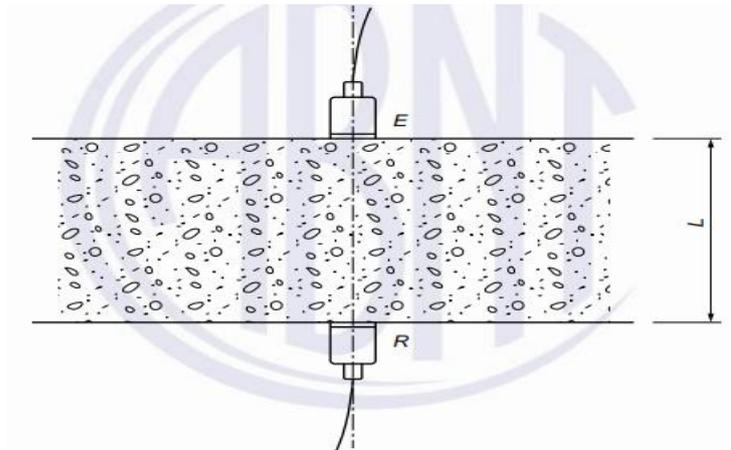
Fonte: PATIL et al., 2019.

Antes da execução do ensaio ultrassônico é necessário identificar a localização da armadura da estrutura a partir do ensaio de pacometria, uma vez que a velocidade propagação das ondas é maior no aço do que no concreto, o que pode interferir no resultado do ensaio (NBR 8802; 2019).

O método da velocidade de pulso ultrassônico pode ser aplicado através de três formas distintas de transmissão: transmissão direta, indireta e semidireta.

Na transmissão direta os transdutores são posicionados em faces opostas da estrutura e no mesmo alinhamento, como apresentado na Figura 5. Nesse arranjo os valores de velocidade da onda já são medidos diretamente (NBR 8802, 2019).

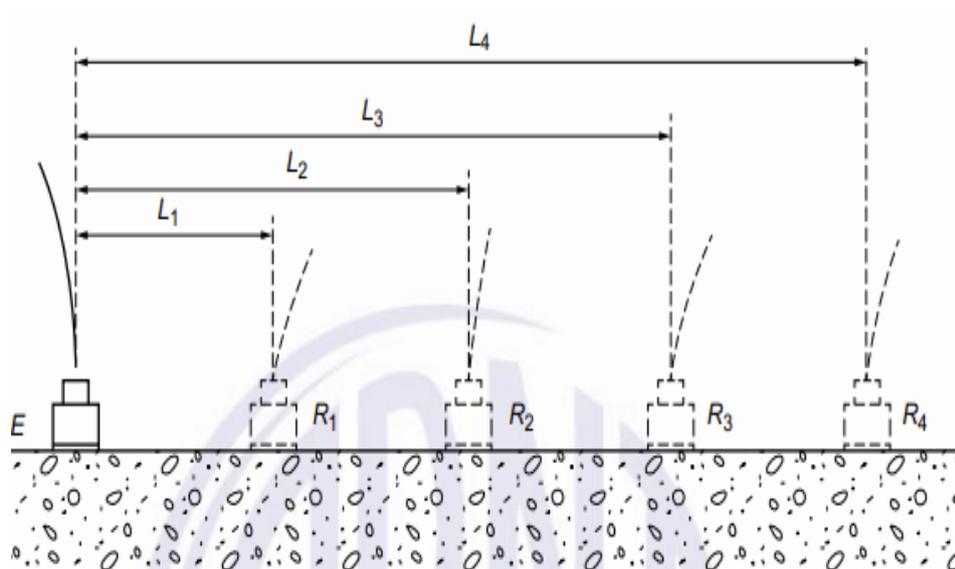
**Figura 5: Transmissão direta.**



Fonte: NBR 8802 – ABNT (2019).

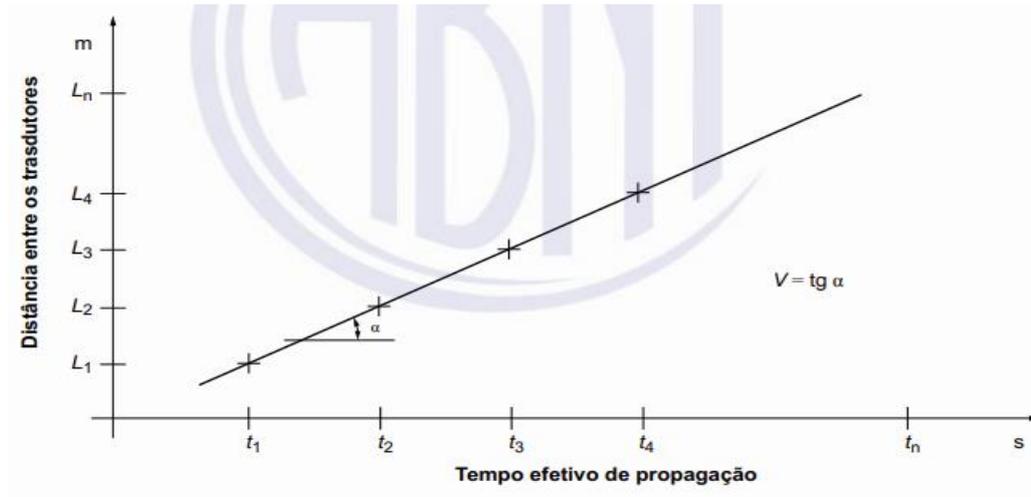
Contudo, quando não é possível ter acesso às faces opostas do elemento é necessário realizar medidas simultâneas ao longo da mesma face da estrutura, para isso o transdutor emissor deve ficar fixo em um ponto enquanto o receptor irá ser posicionado em distâncias equidistantes, como apresentado na Figura 6. Além disso, existe uma diferença na determinação da velocidade do pulso em relação a transmissão direta, na indireta é construído um gráfico conforme a Figura 7, distância entre os transdutores (m) pelo tempo efetivo de propagação (s), e a partir da inclinação da reta é determinada a velocidade de propagação das ondas (NBR 8802, 2019).

**Figura 6: Transmissão indireta.**



Fonte: NBR 8802/2019 – ABNT (2019).

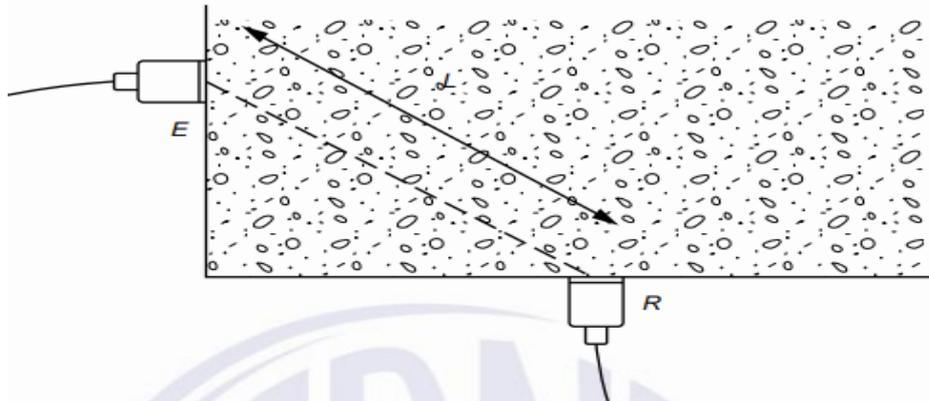
**Figura 7: Exemplo de gráfico obtido pela transmissão indireta.**



Fonte: NBR 8802/2019 – ABNT (2019).

Quando não se tem acesso às duas faces opostas da estrutura e a face não tiver comprimento suficiente para realizar o método indireto, é necessário recorrer à transmissão semidireta, nesse arranjo os transdutores ficam em duas faces não opostas como apresentado na Figura 8 (NBR 8802, 2019).

**Figura 8: Transmissão semidireta.**



Fonte: NBR 8802/2019 – ABNT (2019).

Além da calibração incorreta do equipamento e acoplamento ineficiente dos transdutores, a presença de armadura, densidade, idade e adensamento do concreto, características dos agregados utilizados e tipo de cimento são alguns fatores que influenciam nos resultados do ensaio (NBR 8802, 2019).

Por fim, a partir de inferências e correlações dos resultados do método de ultrassom com outros ensaios, a exemplo o de esclerometria, é possível avaliar as propriedades do concreto e imperfeições (NBR 8802, 2019).

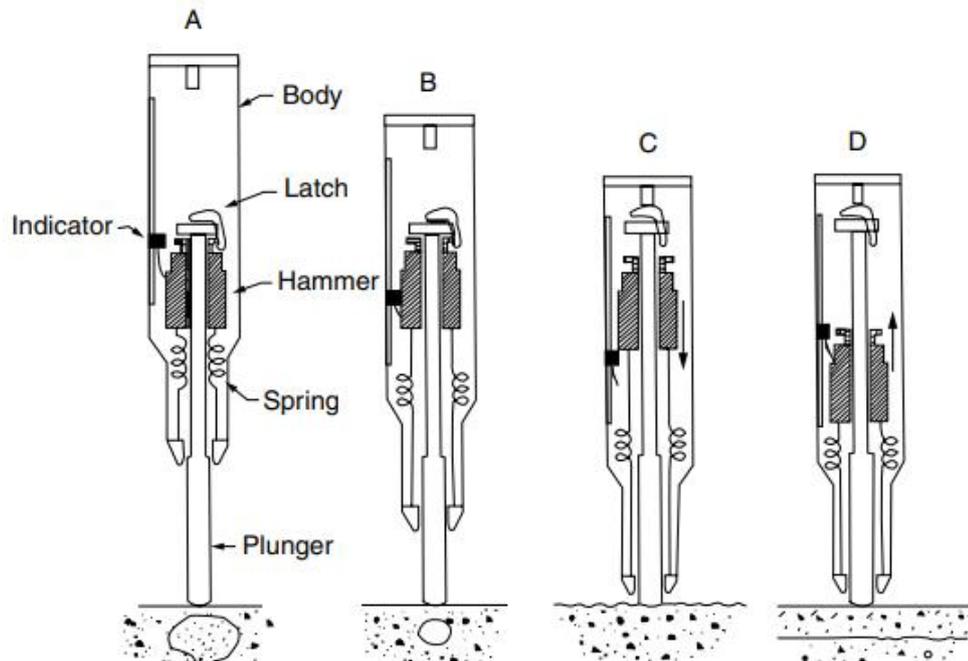
#### **3.3.4. Esclerometria**

O ensaio esclerométrico é um procedimento não destrutivo que utiliza o esclerômetro, também conhecido como martelo de rebote de Schmidt, desenvolvido em 1948 pelo engenheiro suíço Ernst Schmidt. Esse equipamento é amplamente utilizado para avaliar a dureza da superfície do concreto e sua uniformidade (CÁNOVAS, 1988; NEVILLE, 2016).

O ensaio baseia-se na relação teórica entre a resistência do concreto e o número de rebote ou reflexão, permitindo avaliar a qualidade do concreto e correlacionar o índice de reflexão com a resistência à compressão superficial (BUNGEY; MILLARD, 1996). Embora existam correlações empíricas entre essas propriedades, é importante lembrar que há limitações. De acordo com Cánovas (1988), o ensaio avalia apenas a resistência a partir da dureza da camada superficial do concreto, sendo assim uma estimativa. Além disso, a NBR 7584:2012 também traz limitações, afirmando que o ensaio deve ser utilizado apenas como um método adicional ou complementar, pois há vários fatores que podem influenciar nos resultados, como o tipo de agregado, a idade do concreto e a influência da carbonatação, que pode aumentar a dureza superficial do concreto em mais de 50% (NBR 7584, 2012).

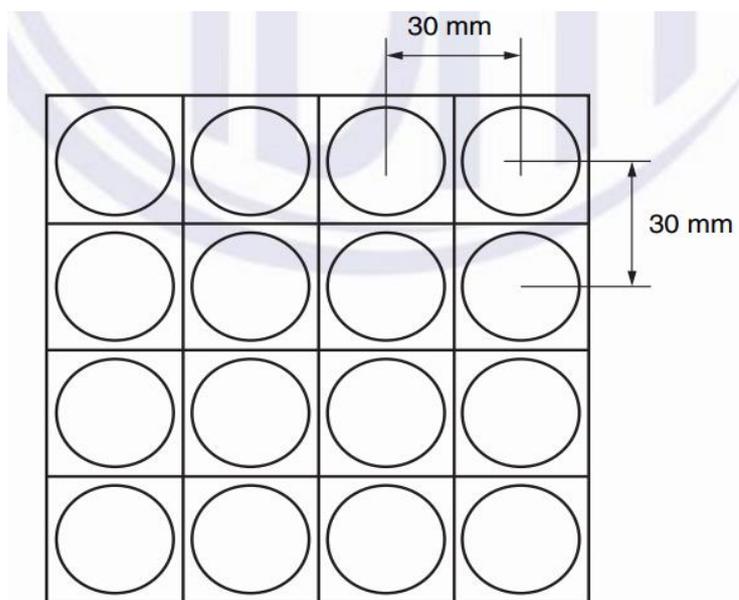
O esclerômetro Schmidt é adequado tanto para uso em laboratório quanto em campo, devido à sua facilidade de transporte. Em relação ao equipamento, como exemplificado na Figura 9, é composto principalmente pelo corpo externo (carcaça), êmbolo, massa do martelo e mola principal, além de um mecanismo de travamento que fixa a massa do martelo à haste do êmbolo e um deslizador para medir o rebote da massa do martelo.

**Figura 9: Exemplo de esclerômetro e funcionamento.**



Fonte: Malhotra e Carino (2004).

Quanto ao ensaio, de acordo com a norma NBR 7584 (ABNT, 2012), devem ser efetuados 16 impactos em cada área de análise, preferencialmente plana, distribuídos uniformemente em toda a região e obedecendo à distância mínima de 30 mm entre os centros de dois pontos. Além disso, devem ser evitados impactos em áreas que não representam apenas o concreto em avaliação, como sobre armaduras, sendo necessário realizar a pacometria da região. Não deve ser aplicado mais de um impacto em um mesmo ponto, pois o segundo valor obtido não pode ser considerado para o cálculo dos resultados (NBR 7584, 2012). A norma especificada também recomenda desenhar um reticulado para definir a área de aplicação do esclerômetro, como mostrado na Figura 10.

**Figura 10: Área de ensaio e pontos de impacto.**

16 impactos

Fonte: NBR 7584 (2012).

Ademais, para realizar o ensaio, deve-se soltar o pistão de sua posição inicial e pressionar o êmbolo contra o concreto com força constante e perpendicularmente à sua superfície, até que a massa com mola seja disparada de sua posição travada. Após o impacto, o índice esclerométrico é lido. É possível reter a leitura pressionando o botão de travamento ou registrar os resultados automaticamente quando o equipamento possuir um registrador de papel. Durante o ensaio, a mola principal que conecta a massa do martelo à carcaça do equipamento é esticada, conforme apresentado na Figura 9. Quando o corpo é levado ao limite, a trava é liberada automaticamente e a energia armazenada na mola impulsiona a massa do martelo em direção à ponta do êmbolo. Após o ressalto da haste do êmbolo, a massa dá um rebote e a distância de retorno ou reflexão é registrada pelo indicador deslizante (BUNGEY; MILLARD, 1996; MALHOTRA; CARINO, 2004).

Por fim, cada esclerômetro é fornecido com curvas de correlação desenvolvidas pelo fabricante usando espécimes de cubo padrão e relacionando em que posição o equipamento foi utilizado.

### **3.3.5. Espessura da frente de carbonatação**

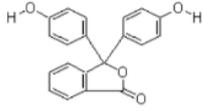
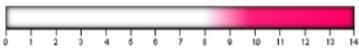
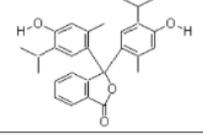
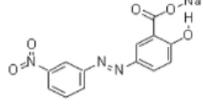
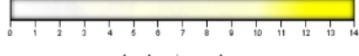
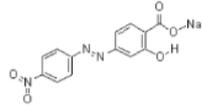
O ensaio para determinação da espessura de carbonatação é essencial, pois, como discutido no tópico 3.2.2, a carbonatação pode afetar a durabilidade e a integridade estrutural

do concreto. Segundo Silva (2007), existem métodos analíticos para medição da espessura de carbonatação, tais como difração de raios-X, termogravimetria, análise térmica diferencial, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia por infravermelho. Além dos métodos analíticos, a medição pode ser realizada por indicadores colorimétricos de pH. Duas das substâncias mais comumente usadas para esse ensaio são a fenolftaleína e a timolftaleína (HELENE; CUNHA, 2001).

No Quadro 7 é apresentado um resumo dos principais indicadores de pH, incluindo os pontos de viragem e a preparação da solução.

**Quadro 7- Indicadores de pH para identificação da carbonatação do concreto.**

Tabela 1.1 – Principais indicadores de pH usados no estudo de carbonatação do concreto.

Indicador de pH	Fórmula química (estrutural) do reagente	Intervalo de mudança de cor <sup>a</sup>	Preparo da solução
Fenolftaleína		 incolor/vermelho carmim faixa de pH 8,3 – 10,0	dissolver 10 g do reagente em 700 cm <sup>3</sup> de etanol e diluir em 300 cm <sup>3</sup> de água destilada <sup>b</sup>
Timolftaleína		 incolor/azul faixa de pH 9,3 – 10,5	dissolver 0,4 g do reagente em 600 cm <sup>3</sup> de etanol e diluir em 400 cm <sup>3</sup> de água destilada <sup>c</sup>
Amarelo de alizarina GG (ácido meta-nitrobenzeno-azo-salicílico) C.I. 14025		 amarelo claro/amarelo escuro faixa de pH 10,1 – 12,0	dissolver 1 g do reagente em 100 cm <sup>3</sup> de etanol e diluir em 900 cm <sup>3</sup> de água destilada <sup>da</sup>
Amarelo de alizarina R (ácido para-nitrobenzeno-azo-salicílico) C.I. 14030		 amarelo/vermelho alaranjado faixa de pH 10,1 – 12,0	dissolver 0,5 g do reagente em 800 cm <sup>3</sup> de etanol e diluir em 200 cm <sup>3</sup> de água destilada <sup>c</sup>

Fonte: CASTRO (2003).

É importante ressaltar que o ensaio por indicador químico é um ensaio semi-destrutivo. Para que seja possível a medição da frente de carbonatação com o paquímetro, é necessário fraturar até determinada profundidade a estrutura e aspergir o indicador ácido-base. Além disso, é preciso realizar o ensaio instantaneamente ou em até 15 minutos após a retirada, pois as novas superfícies expostas carbonatam-se rapidamente (HELENE, 1993).

A fenolftaleína é um indicador ácido-base que muda de cor em um pH de aproximadamente 8,3 a 10,0. Quando a solução é alcalina, a fenolftaleína se torna vermelho carmim, representando a região não carbonatada. No entanto, quando o pH está abaixo de 8,3, a fenolftaleína permanece incolor, indicando a região carbonatada (HELENE, 1993). Uma das formas de preparar a solução de indicador, de acordo com a DIN EN 14630:2006, é dissolvendo

1g de fenolftaleína em 70 ml de álcool etílico e diluído para 100 ml com água destilada ou deionizada.

Outra maneira de realizar o ensaio é com a timolftaleína, um indicador ácido-base que apresenta ponto de viragem em um pH de aproximadamente 9,3 a 10,5. Quando a região do concreto não está carbonatada, a timolftaleína se torna azul escuro. No entanto, para a região carbonatada, a timolftaleína continua incolor (HELENE, 1993; HELENE; CUNHA, 2001).

Ambos os indicadores podem ser usados para detectar a presença de carbonatação no concreto. Sendo a fenolftaleína o indicador utilizado frequentemente na realização dos ensaios, por ser considerado um material de baixo custo, apresentando facilidade e rapidez no ensaio e precisão relativamente boa (SILVA, 2007).

Por fim, vale ressaltar que esses ensaios utilizando fenolftaleína e timolftaleína são qualitativos e não quantitativos, ou seja, eles indicam apenas a presença ou ausência de ácido carbônico na amostra e, com auxílio do paquímetro, a extensão da frente de carbonatação, mas não fornecem informações sobre a concentração.

### **3.3.6. Profundidade da penetração de cloretos**

O ensaio para determinação da penetração de cloretos também é um método colorimétrico, porém utiliza uma solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ).

Quando os íons cloreto estão presentes, ocorre a formação de um precipitado branco, o cloreto de prata ( $\text{AgCl}$ ). Por outro lado, nas regiões sem cloretos ou com cloretos combinados, ocorre a formação de um precipitado marrom, o óxido de prata (FRANÇA, 2011).

Vale ressaltar, que o ensaio de presença de cloretos pode apresentar um “falso positivo” em estruturas que apresentam a carbonatação ou outras substâncias que podem reagir com o nitrato de prata, a exemplo álcalis e sulfatos (FRANÇA, 2011).

Além disso, da mesma forma que o ensaio de frente de carbonatação, o de presença de cloretos ou frente de cloreto por método colorimétrico é apenas um ensaio qualitativo, ou seja, apenas determina a presença ou não de cloreto, sem determinar sua concentração.

### **3.3.7. Potencial de corrosão**

É um método de ensaio descrito na norma ASTM C 876 (2015) que é utilizado para medir o potencial de corrosão no aço da estrutura de concreto armado. Esse ensaio é realizado por meio da medição da diferença de potencial (ddp) entre o aço e um eletrodo de referência em

contato com a superfície do concreto. O eletrodo de referência mais comum é o de cobre/sulfato de cobre, mas outros podem ser utilizados (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Vale ressaltar que o ensaio não fornece a ddp se a armadura estiver corroendo ou a velocidade de corrosão que pode vir a acontecer, mas sim a probabilidade de corrosão na armadura. Além disso, as medições podem ser usadas para desenvolver um mapa potencial que mostra os possíveis locais de corrosão na estrutura (ASTM C876, 2015).

Para realizar a medição, um voltímetro de alta impedância, de 10 a 200 M $\Omega$ , é conectado entre a armadura e o eletrodo de referência, que é apoiado na superfície do componente estrutural. Como descrito na ASTM C876: 2015 são realizadas medições sucessivas partindo dos 10 M $\Omega$  até chegar em 200 M $\Omega$  (ASTM C876, 2015; HELENE, 1993).

A ASTM C 876 (2015) estabelece parâmetros para avaliar em porcentagem as chances de o material entrar em corrosão, como apresentado no Quadro 8.

**Quadro 8: Critérios da ASTM para probabilidade de corrosão do aço no concreto.**

Ecorr (mV)	Probabilidade de corrosão
> - 200	menor que 10%
entre -200 e -350	incerta
<-350	maior que 90%

**Fonte: Adaptado de ASTM C876, 2015.**

Embora seja um método rápido, os resultados do ensaio podem ser afetados por diversos fatores, a exemplo a qualidade da conexão entre o eletrodo de referência e o concreto, a presença de outros materiais condutores próximos à armadura, a interferência de correntes externas, o cobrimento do concreto, espessura da frente de carbonatação. Por isso, é importante seguir o procedimento de ensaio padronizado e considerar as limitações do método ao interpretar os resultados (HELENE, 1993).

#### 4. METODOLOGIA

Para realizar a avaliação dos três reservatórios, foram adotadas algumas etapas metodológicas com o objetivo de obter informações sobre o estado das estruturas.

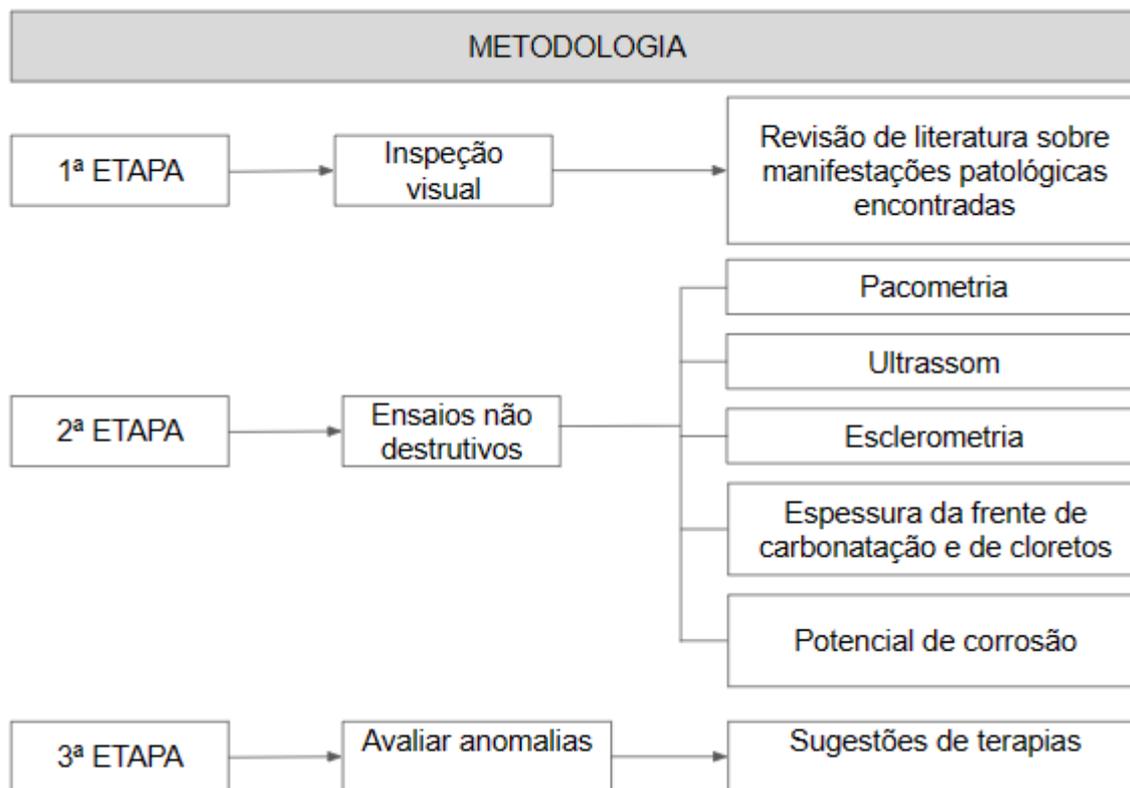
Inicialmente, foram realizadas visitas técnicas aos reservatórios para uma inspeção visual minuciosa e registro fotográfico, a fim de identificar possíveis manifestações patológicas e danos estruturais; verificadas as anomalias, fez-se uma pesquisa bibliográfica para entender suas causas e origens. Durante essas visitas, foram realizadas medições e coleta de dados sobre as dimensões das estruturas, bem como informações sobre o histórico de manutenção e operação dos reservatórios.

Em seguida, foram executados ensaios não destrutivos e parcialmente destrutivos com o objetivo de obter informações mais internas sobre o estado das estruturas sem prejudicar sua integridade. O primeiro teste aplicado foi a técnica de pacometria, que permite a avaliação da localização das barras de aço presentes na estrutura. Em seguida, foram realizados ensaios de ultrassom, que permitem a identificação de possíveis falhas ou descontinuidades na estrutura. Foram também realizados ensaios de esclerometria, que avaliam a dureza superficial do concreto, e medição de espessura da frente de carbonatação.

Para complementar as informações obtidas, foi realizado o ensaio de potencial de corrosão, que consiste na medição do potencial elétrico das estruturas, identificando possíveis áreas de risco.

O fluxograma da metodologia utilizada neste trabalho está apresentado na figura a seguir:

**Figura 11: Metodologia desenvolvida no trabalho**



Fonte: Autor (2023).

#### 4.1. Objeto de estudo e descrição dos Reservatórios

O estudo foi realizado em três reservatórios elevados de água localizados em Aracaju – SE. Os reservatórios apresentam estrutura semelhante, sendo cilíndricos e construídos em concreto armado. Além disso, a estrutura desses reservatórios é composta por pilares e paredes de concreto, além de possuir duas cubas para armazenamento de água. Verticalmente a estrutura é dividida em cinco partes: térreo, 1ª cuba, 1º patamar, 2º patamar e 2ª cuba. Para permitir o acesso a todos os pavimentos do reservatório, há uma escada central engastada em um dos pilares.

O sistema construtivo de formas deslizantes foi utilizado na concretagem das paredes dos reservatórios.

Apesar de não ter sido possível obter a idade exata dos reservatórios, estima-se que todos apresentem idades entre 15 e 20 anos.

Por fim, a altura estimada dos reservatórios é de 20 m e diâmetro de aproximadamente 3,80 m.

## **4.2. Aplicação dos ensaios**

### **4.2.1. Inspeção visual e fotográfica**

Durante a inspeção visual e fotográfica, realizada no interior e exterior dos reservatórios, foram avaliados os elementos estruturais com o intuito de obter uma visão geral da estrutura, identificando anomalias como fissuras, deslocamentos, corrosão e eflorescências. Durante esse procedimento, utilizou-se registro fotográfico para catalogar as manifestações patológicas aparentes e anotou-se os pontos de interesse para os futuros ENDs.

### **4.2.2. Pacometria**

O ensaio de pacometria foi realizado com o equipamento Profoscope fabricado pela Proceq, o qual pode ser visualizado na Figura 12. A execução desse ensaio consistiu em passar o equipamento lentamente pela superfície do elemento estrutural em análise, com o objetivo de determinar a posição da armadura principal e estribos e formar uma malha que seria utilizada nos próximos ensaios, como exemplificado na Figura 13. Posteriormente, à localização das barras, foi estimado o cobrimento e o diâmetro dos estribos e da armadura principal. Para essa etapa, o equipamento foi inicialmente calibrado para um parâmetro de diâmetro padrão de 12 mm. No caso dos valores de estribo, foi considerado o diâmetro padrão de 5 mm.

**Figura 12: Pacômetro da Proceq.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 13: Exemplo de malha das armaduras detectadas por meio da pacometria**

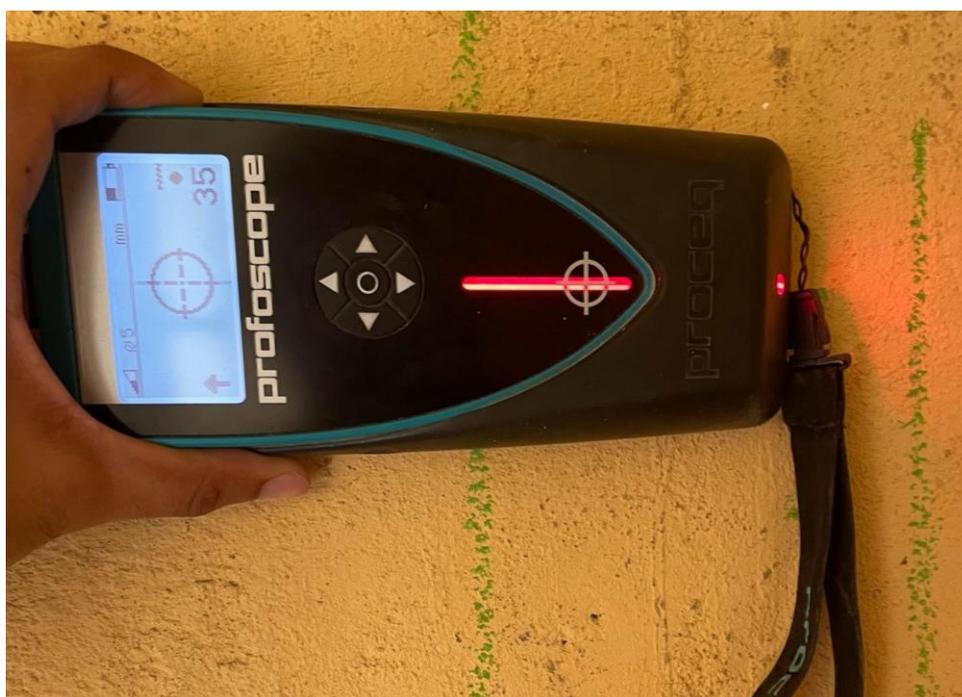


**Fonte: Autor (2023).**

Durante o ensaio, sempre que o equipamento detectava a presença de uma barra, emitia um alerta sonoro e a luz correspondente, conforme apresentado na Figura 14, acendia e na tela do equipamento era possível visualizar o eixo da barra. Além da localização das barras e

estimativa do diâmetro, o equipamento também apresentava a estimativa de cobertura. Essa informação era exibida no lado direito da tela, conforme ilustrado na Figura 14. Com essa estimativa, foi possível avaliar se o revestimento das armaduras estava de acordo com as normas técnicas aplicáveis.

**Figura 14: Pacômetro em utilização.**



Fonte: Autor (2023).

#### 4.2.3. Ultrassom

Para a realização do ensaio de ultrassom, atendeu-se a norma ABNT NBR 8802:2019, e na aparelhagem, conforme a Figura 15, utilizou-se um equipamento da marca USLAB, composto por um par de transdutores, - um emissor e outro receptor - de frequência 54 kHz e faces planas. Para garantir a precisão das leituras foi necessário inicialmente realizar a calibragem do equipamento e regularizar a superfície da estrutura para garantir uma área mais plana possível para os transdutores, além disso, para evitar a influência do aço nas leituras das velocidades e tempos das ondas ultrassônicas, utilizou-se da malha de barras obtida no ensaio de pacometria, acoplado os transdutores sempre no centro das malhas. Ademais, para acoplar de maneira correta os transdutores na estrutura e garantir a propagação inicial da onda, foi realizada a aplicação de um gel condutor da marca Mercur.

**Figura 15: Equipamento de ultrassom utilizado.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 16: Gel condutor utilizado.**



**Fonte: Autor (2023).**

Para a análise dos pilares, empregou-se o método direto, posicionando cada transdutor em faces opostas para realizar a medição. Já para as paredes, optou-se pelo método indireto por não haver acesso às duas faces de forma simultânea, marcando pontos equidistantes na face e acoplando o emissor em um ponto fixo enquanto o receptor variava nesses pontos.

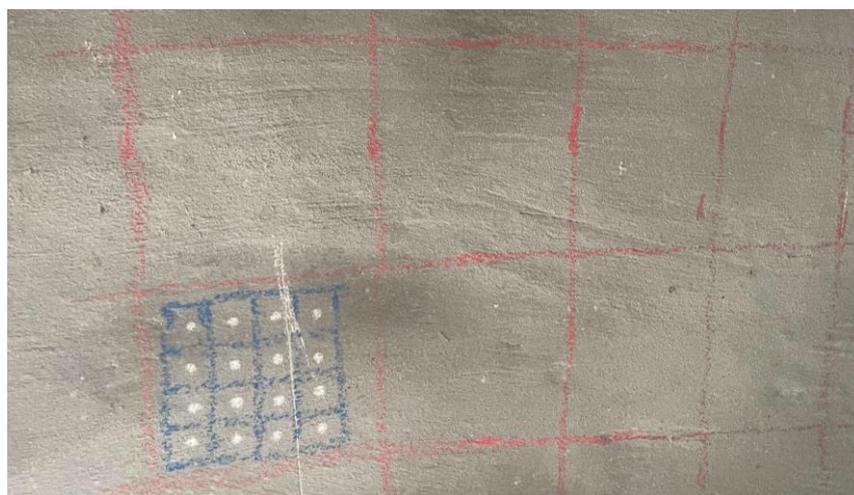
É importante ressaltar que, antes de iniciar as medições com o ultrassom, o equipamento foi calibrado utilizando uma barra acrílica, a fim de garantir a precisão das medições. Após a medição, para cada ponto de análise, era anotado o valor obtido pelo equipamento, a fim de possibilitar a análise posterior dos resultados.

#### **4.2.4. Esclerometria**

O ensaio foi executado seguindo as orientações da ABNT NBR 7584:2012 e com auxílio do esclerômetro tipo Schmidt da marca Proceq. A priori, para evitar impactos sobre as armaduras, foi utilizada a malha obtida no ensaio de pacometria, e a partir dela foi desenhado um reticulado para delimitar a área de aplicação do esclerômetro, como mostrado na Figura 17. O reticulado apresentava 16 pontos de impacto distribuídos uniformemente e obedecendo à distância mínima de 30 mm entre os centros de dois pontos.

A execução do ensaio consistiu em pressionar o equipamento contra o elemento estrutural analisado, de forma perpendicular, e realizar uma série de impactos no reticulado previamente desenhado. Após os impactos, era anotado o valor de rebote medido pelo equipamento.

**Figura 17: Reticulado para o ensaio de esclerometria.**



**Fonte: Autor (2023).**

#### 4.2.5. Espessura da frente de carbonatação

Para garantir que o local em análise se apresentava sobre a barra de aço, a área de aplicação do ensaio foi determinada no encontro entre as linhas verticais e horizontais da malha executada no ensaio de pacometria, conforme Figura 18.

**Figura 18: Marcação da área de estudo**



**Fonte: Autor (2023).**

Para a execução do ensaio, inicialmente com o auxílio de uma furadeira foram realizados furos de profundidade compreendida entre 2 e 3 cm, conforme a Figura 19.

**Figura 19: Execução do furo no local em estudo**



**Fonte: Autor (2023).**

Após a perfuração, utilizou-se um pincel para remover todo o pó e resíduos gerados durante o processo. Em seguida, utilizando luvas e um borrifador, foi aspergida a solução alcoólica de fenolftaleína a 1%.

Como apresentado na revisão de literatura, as áreas em vermelho-carmim ou rosa representavam um trecho não carbonatado, enquanto a parte incolor era referente a uma camada com carbonatação, então para concluir o ensaio, utilizando um paquímetro foi verificada a espessura da frente incolor e anotada a espessura da frente de carbonatação.

Na Figura 20 é apresentada a interface da frente de carbonatação por indicador de pH.

**Figura 20: Aspersão de fenolftaleína na área de estudo**

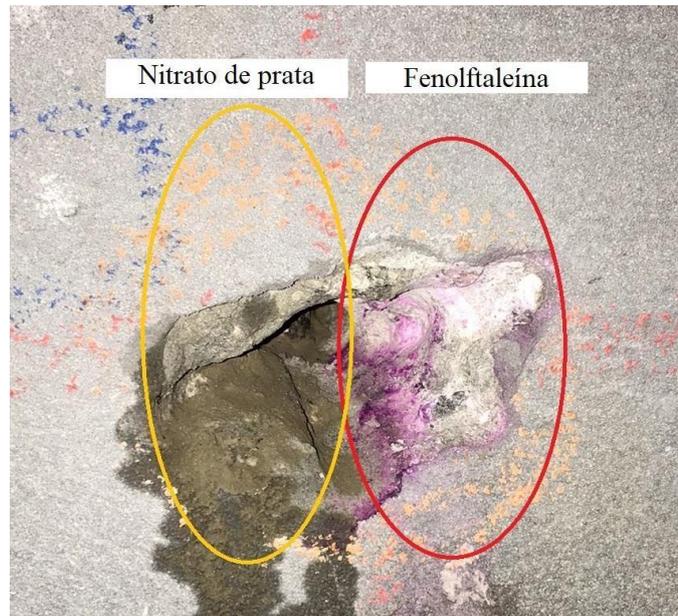


**Fonte: Autor (2023).**

#### **4.2.6. Espessura de presença de cloretos**

Para realizar o ensaio aproveitou-se do furo realizado para o ensaio da frente de carbonatação, para isso delimitaram-se duas regiões, uma para realizar o ensaio de carbonatação e outra para presença de cloretos, conforme a Figura 21. O ensaio consistiu em aspergir uma solução de nitrato de prata na estrutura e avaliar de maneira visual a mudança de cor, e após isso, de maneira análoga ao ensaio da frente de carbonatação, foi utilizado um paquímetro para medir a profundidade da frente de presença de cloretos na estrutura.

**Figura 21: Divisão da área de estudo, para aplicação de nitrato de prata e fenolftaleína.**



**Fonte: Autor (2023).**

#### **4.2.7. Potencial de corrosão**

Para a realização do ensaio de potencial de corrosão, foram utilizados os furos anteriormente realizados no ensaio de espessura de carbonatação para ter acesso a armadura. A fim de medir a diferença de potencial (ddp) entre o aço da armadura e o eletrodo de referência, utilizou-se um multímetro da marca Fluke e um eletrodo de calomelano.

O procedimento consistiu em fixar uma das pontas de prova na barra de aço em análise, enquanto a outra ponta de prova, o eletrodo de referência, foi colocado em contato com a superfície do concreto. Dessa forma, foi possível medir a ddp entre o aço da armadura e o eletrodo de referência, a partir da qual se pôde avaliar o potencial de corrosão do material.

## 5. INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DO ESTUDO DE CASO

Nesse tópico serão apresentadas as manifestações patológicas encontradas na inspeção visual. Além disso, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados. Por fim, a partir das anomalias encontradas, serão feitas recomendações para a terapia das manifestações.

### 5.1. Diagnóstico da inspeção visual

Durante a inspeção visual realizada nos reservatórios, foram verificadas fissuras, deslocamentos, pontos com armadura exposta com corrosão, manchas de umidade e eflorescência. Além disso, os reservatórios apresentaram similaridade no tipo de manifestações patológicas presentes.

Além das manifestações patológicas citadas, nas escadas central de acesso havia, pontualmente, a oxidação do material.

Ao analisar as Figuras 22, 23, 24, 25 e 26, pode-se observar a presença de fissuras. Essas anomalias foram de ocorrência da dilatação térmica da estrutura, de falha construtiva entre as emendas da forma e também pelo fato da ocorrência de oxidação e posterior corrosão interna das armaduras, que pela sua expansão volumétrica gerou tensões que superaram a resistência do material.

**Figura 22: Fissura presente no pilar, reservatório 1.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 23: Fissura presente na laje de cobertura, reservatório 1.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 24: Fissura e iminente deslocamento do concreto, reservatório 2.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 25: Fissura presente na laje de cobertura, reservatório 3.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 26: Fissura presente na laje de fundo da cuba, reservatório 3.**



**Fonte: Autor (2023).**

Nas figuras a seguir, podem-se observar o deslocamento do concreto com a exposição da armadura e em alguns pontos o deslocamento iminente. Essa manifestação patológica tem

sua origem principalmente na expansão volumétrica da armadura, gerando tensões superiores às que o concreto pode suportar. Além disso, a falta de cobrimento adequado em alguns pontos permitiu essa situação ocorrer. Essas manifestações patológicas comprometem a integridade estrutural, aumentando os riscos de corrosão e redução da capacidade da estrutura resistir aos esforços solicitantes.

**Figura 27: Deslocamento do concreto e armadura exposta, reservatório 1.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 28: Deslocamento do concreto e armadura exposta, reservatório 2.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 29: Iminente deslocamento do concreto, reservatório 3.**



**Fonte: Autor (2023).**

Além da exposição da armadura após o deslocamento, percebeu-se também a remoção do concreto para passagem de tubulações que possivelmente não constavam no projeto.

**Figura 30: Abertura na parede de concreto e armadura exposta, reservatório 2.**



**Fonte: Autor (2023).**

Nas Figuras 31, 32, 33, 34 e 35 é possível observar pontos de corrosão da armadura sem nenhum tratamento. A corrosão da armadura foi resultado da entrada de agentes agressivos pelas fissuras existentes e da falta de cobrimento adequado. Adicionalmente, a exposição da

armadura após os deslocamentos e aberturas sem compatibilização acelerou significativamente o processo de corrosão.

**Figura 31: Processo de corrosão em armadura exposta, reservatório 1.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 32: Processo de corrosão em armadura exposta, reservatório 1.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 33: Processo de corrosão em armadura exposta, reservatório 2.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 34: Processo de corrosão em armadura exposta próximo a laje de cobertura, reservatório 3.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 35: Processo de corrosão em armadura exposta na parede de concreto, reservatório 3.**



**Fonte: Autor (2023).**

Ademais, a inspeção realizada nos reservatórios identificou infiltrações nas paredes e elementos estruturais, resultado principalmente de falhas no sistema construtivo, como fissuras nas emendas das formas, por ter execução construtiva de formas deslizantes, além de deficiências no sistema de impermeabilização das cubas, decorrente da má execução do sistema e da sua manutenção. Além disso, há também fissuras, que permitem a percolação de água, que podem ter sido decorrentes do processo de expansão volumétrica das armaduras. Essas condições comprometem a estanqueidade do reservatório, o que acarretou vazamentos e deterioração prematura da estrutura.

Nas Figuras 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42 e 43 pode-se notar a presença de manchas nos reservatórios, indicativo de umidade e eflorescências.

**Figura 36: Pontos de infiltração e eflorescência, reservatório 1.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 37: Pontos de infiltração e eflorescência, reservatório 1.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 38: Pontos de infiltração e eflorescência, na região da cuba, reservatório 2.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 39: Pontos de umidade, localizados na laje de fundo da cuba, reservatório 2.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 40: Pontos de infiltração e eflorescência entre emendas da forma, reservatório 2.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 41: Pontos de eflorescências na laje de fundo da cuba, em proximidades de tubulação, reservatório 2.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 42 Pontos de eflorescências na laje de fundo da cuba, reservatório 3.**



**Fonte: Autor (2023).**

**Figura 43: Pontos de infiltração na laje de fundo da cuba, reservatório 3.**



**Fonte: Autor (2023).**

## **5.2. Resultado dos ensaios**

Os resultados dos ensaios a serem apresentados têm como objetivo demonstrar a viabilidade da metodologia proposta para obtenção de dados relevantes sobre as características internas dos elementos estruturais analisados. É importante ressaltar que, embora os ensaios forneçam informações valiosas, não será realizada a correlação entre eles, uma vez que esse não é o foco central deste trabalho. No entanto, os dados obtidos serão utilizados para uma análise individual de cada ensaio.

### **5.2.1. Pacometria**

Por meio do ensaio de pacometria, constatou-se que em alguns pontos há um cobrimento nominal insatisfatório em relação à ABNT NBR 6118:2014. No entanto, é importante ressaltar

que, de acordo com a norma vigente na época da construção, os valores de cobrimento eram considerados satisfatórios.

Além disso, o ensaio revelou uma certa uniformidade nos espaçamentos dos estribos e da armadura principal

### **5.2.2. Ultrassom**

A partir dos resultados das velocidades das ondas de ultrassom, ficou evidenciado que existia em alguns pontos das estruturas diferenças no nível de qualidade interna do concreto. Essas diferenças foram verificadas por conta da diminuição de velocidade da onda, e podem ter ocorrido devido a presença de fissuras, vazios de concretagem e/ou segregação.

### **5.2.3. Esclerometria**

O ensaio de esclerometria forneceu valores para avaliar a qualidade do concreto do ponto de vista da sua dureza superficial.

Verificou-se que existem algumas diferenças na dureza superficial do concreto em diferentes partes da estrutura, mesmo que em alguns elementos estruturais apresentasse certa homogeneidade. Essa diferença foi perceptível devido às mudanças que ocorriam na leitura do esclerômetro e do índice esclerométrico.

### **5.2.4. Espessura da frente de carbonatação**

Em grande parte dos pontos analisados, não foi observado um avanço significativo do processo de deterioração por carbonatação. No entanto, houve algumas exceções, onde foi constatado o avanço da carbonatação em pelo menos 1 cm.

Vale ressaltar que para as armaduras expostas ao ar e trechos com deslocamento há a carbonatação por não apresentar mais camada protetora e está exposto diretamente ao dióxido de carbono.

### **5.2.5. Presença de cloretos**

Semelhante aos resultados da frente de carbonatação, no ensaio de presença de cloretos, em grande parte dos pontos analisados, não foi observado um avanço significativo do processo de deterioração por cloreto. No entanto, houve algumas exceções, onde foi constatado o avanço da cloretos em pelo menos 1 cm.

### **5.2.6. Potencial de corrosão**

De acordo com o Ensaio de Potencial de Corrosão, foram identificados pontos com probabilidade de corrosão classificada como superior a 90%. Além disso, grande parte das janelas amostrais apresentaram probabilidade de corrosão incerta. É importante ressaltar que as estruturas estão em um centro urbano próximo ao ambiente marinho, e que pela presença de fissuras e umidade, a probabilidade de corrosão em curto prazo é elevada.

### **5.3. Sugestão de correções**

Considerando as manifestações patológicas identificadas nos reservatórios, que podem futuramente representar riscos para a segurança das pessoas e das estruturas adjacentes, neste tópico serão propostas sugestões de intervenções para tratamento dessas manifestações.

Os procedimentos a serem realizados, terão como embasamento os trabalhos de Helene (1992) e Souza e Ripper (1998).

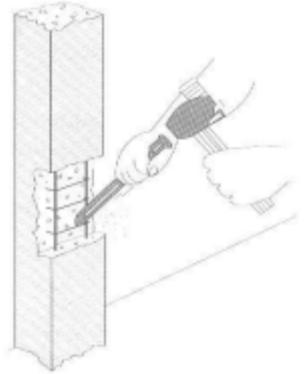
É fundamental destacar que a execução dos procedimentos a serem descritos requer a presença de um profissional devidamente qualificado, além do acompanhamento de um engenheiro responsável. Além disso, é obrigatoriamente necessário que sejam utilizados todos os Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) necessários durante a realização das atividades.

Antes de iniciar o processo de correção, é fundamental realizar o preparo e a limpeza das superfícies que serão submetidas à recuperação. O preparo tem como objetivo realizar um tratamento prévio na superfície, em uma série de procedimentos que visam melhorar a aderência e a eficácia dos materiais de recuperação a serem aplicados, enquanto a limpeza é necessária para remover todas as impurezas, eflorescências, manchas, pó, natas de cimento e produtos que ficaram na superfície por conta de intervenções antigas (HELENE, 1992).

Nos trechos que apresentarem camadas superficiais danificadas, contaminadas, segregadas ou comprometidas do concreto, a exemplo das situações apresentadas nas Figuras 27, 28, 29 e 30, deve ser realizada a escarificação manual, referente a Figura 44, ou mecânica, referente a Figura 45. As camadas comprometidas podem afetar a aderência e a eficácia dos materiais de recuperação que serão aplicados posteriormente, portanto, a escarificação vai ser utilizada para expor uma superfície mais saudável e estável do concreto, removendo as áreas problemáticas, além disso, terá como objetivo melhorar a rugosidade da superfície do concreto,

proporcionando uma aderência mecânica mais eficiente entre os materiais de recuperação e o substrato.

**Figura 44: Escarificação ou apicoamento manual.**



Fonte: Helene (1992).

**Figura 45: Escarificação ou apicoamento mecânico.**



Fonte: Helene (1992).

A escarificação ou apicoamento deve ser realizada com cuidado para evitar a danificação do concreto saudável e restringir a retirada da camada realmente necessária. Para realizar o

procedimento de forma manual os equipamentos necessários são: ponteira, talhadeira e marreta e para o procedimento mecânico é necessário rebarbador eletromecânico ou fresas.

Nos trechos que seja necessário remover irregularidades, como rebarbas e pontos ásperos, depósitos superficiais, como eflorescências, ou camadas superficiais contaminadas do concreto será realizado o lixamento manual ou elétrico, conforme a Figura 46 e Figura 47, respectivamente.

**Figura 46: Lixamento manual.**



**Fonte: Helene (1992).**

**Figura 47: Lixamento elétrico.**



**Fonte: Helene (1992).**

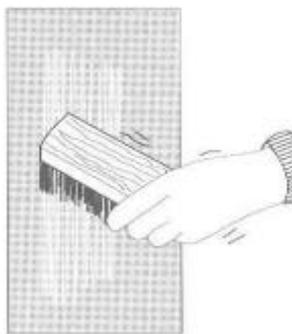
No lixamento manual serão utilizadas lixas para concreto e lixa de ferro para aço. Na utilização das lixas deve-se realizar movimentos circulares e energéticos na superfície de interesse até a remoção completa do material indesejável.

Nos pontos com maior dificuldade de remoção de crostas e para uma maior regularização da superfície, será realizado lixamento elétrico. O equipamento necessário é uma lixadeira

eletromecânica com um disco de lixa acoplado. Por fim, o procedimento consiste em realizar movimentos circulares, mantendo a lixa paralela à superfície.

Para a limpeza das barras de aço, além do lixamento manual, será realizado o escovamento manual, conforme Figura 48. Esse procedimento consiste em realizar movimentos verticais na armadura com uma escova com cerdas de aço até a remoção total da crosta de corrosão ou até que se transpareça aparência metálica da barra. Essa limpeza será necessária em situações como as apresentadas nas Figuras 27, 28, 31, 32, 33 e 35, ou em situações que após a remoção de concreto comprometido foi observado corrosão da armadura.

**Figura 48: Escovamento manual.**



**Fonte: Helene (1992).**

Após o preparo da superfície será necessário remover fragmentos como poeiras e resíduos. Para realizar a limpeza geral da estrutura será utilizado o jato de água fria, conforme Figura 49, o procedimento consiste em lavar as superfícies com uma mangueira de alta pressão e bico direcional. Deve-se iniciar a limpeza pelas partes mais altas e utilizar água limpa.

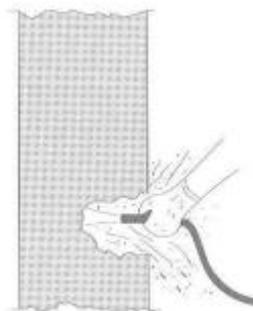
**Figura 49: Limpeza com jato de água fria.**



**Fonte: Helene (1992).**

Após a lavagem geral da estrutura para remoção dos resíduos, nas cavidades de reparo deve-se utilizar, após a secagem, o jato de ar comprimido para remover a poeira remanescente, conforme Figura 50. O equipamento necessário é uma mangueira de alta pressão e compressor.

**Figura 50: Limpeza com jato de água fria.**



**Fonte: Helene (1992).**

Após a preparação e limpeza da estrutura, é possível iniciar as intervenções necessárias. Uma etapa importante é verificar se houve perda de seção das barras de aço após o escovamento ou lixamento. Caso a perda seja inferior a 15%, as armaduras devem ser tratadas com um primer anticorrosivo à base de epóxi rico em zinco. Porém, se a corrosão for superior aos 15% é necessário realizar um reforço estrutural (SOUZA E RIPPER, 1998).

Para promover a estanqueidade dos elementos estruturais e reduzir a entrada dos agentes agressivos, é essencial realizar a recuperação das áreas com fissuras. Após a etapa de preparação e limpeza, o processo de recuperação das fissuras será realizado por injeção, esse processo requer o uso de diferentes materiais. Isso ocorre devido à presença de fissuras passivas, tanto com quanto sem fluxo de água, e fissuras ativas, com fluxo de água, como é o caso das fissuras presentes na laje de cobertura (tampa do reservatório).

Para as fissuras passivas e sem presença de água, será utilizada uma resina à base de epóxi. Já para as fissuras passivas com fluxo de água, como é o caso das fissuras presentes na laje de fundo das cubas, e fissuras ativas com presença de água, como é o caso da tampa do reservatório, serão utilizadas injeções de poliuretano - PU Espuma e PU Gel. O PU Espuma será utilizado para estancar temporariamente o fluxo de água, uma vez que, em contato com água, expande-se, enquanto o PU Gel terá a função de selar.

Nas cubas que armazenam água, é necessário não apenas realizar o reparo das fissuras, mas também interromper o uso do reservatório para drenar a água e inspecionar o sistema de

impermeabilização interno. Isso ocorre porque, além das fissuras, também foi identificada uma falha no sistema de impermeabilização, apresentado no fluxo de água na laje de fundo da cuba. Portanto, confirmada a falha no sistema de impermeabilização, será necessário remover toda a impermeabilização, realizar a raspagem e limpeza de toda a cuba, além disso verificar se há alguma fissura interna a cuba para ser realizado o fechamento. Por fim, após toda remoção e verificação, uma opção viável seria substituir o sistema de impermeabilização existente por mantas de PVC.

Após as intervenções, é necessário realizar a recomposição das áreas onde o concreto foi removido. É importante destacar que o novo revestimento deve estar em conformidade com a norma vigente de execução, a NBR 6118:2014. Para garantir a aderência entre o concreto novo e o concreto antigo, além da rugosidade gerada pelo apicoamento, será aplicado um adesivo estrutural à base de epóxi. Quanto ao preenchimento das formas, deve ser utilizado um concreto de grauteamento.

## 6. CONCLUSÃO

A metodologia aplicada e os ensaios realizados neste estudo permitiram obter informações e dados relevantes sobre a estrutura dos reservatórios, tanto em análise interna dos elementos estruturais quanto superficial. Por meio dessas abordagens, foi possível investigar as condições físicas, mecânicas e químicas das estruturas, identificando as manifestações patológicas. Os dados obtidos serviram para compreender a integridade da estrutura e foram utilizados para embasar as sugestões de terapia dos problemas identificados.

A partir das análises realizadas, foi possível identificar as seguintes manifestações patológicas em todos os reservatórios: corrosão das armaduras, fissuras, deslocamento, carbonatação, presença de cloretos e eflorescência, havendo diferença apenas em seu nível de gravidade visual.

Além disso, com base nas inspeções realizadas, foi constatado que os reservatórios requerem uma intervenção imediata para a adoção de procedimentos de recuperação e reparo. Essa medida se faz necessária para restabelecer sua segurança e confiabilidade de uso, promover um desempenho adequado e prolongar a vida útil.

Ademais, a sequência metodológica desenvolvida durante o estudo de caso, mostrou-se eficiente para obter informações pertinentes na inspeção de um reservatório elevado e de estruturas de concreto armado em geral.

Portanto, foi possível identificar, analisar e propor soluções para as manifestações patológicas existentes nos reservatórios, logo, conclui-se que os objetivos deste trabalho foram alcançados.

Por fim, alerta-se que, as soluções propostas neste trabalho são recomendações que podem sofrer mudanças a depender de cada problema em específico.

Como sugestão para trabalhos futuros, seria relevante desenvolver correlações aprofundadas entre os ensaios realizados. Além disso, também seria pertinente investigar se reservatórios construídos há menos de 10 anos apresentam manifestações patológicas semelhantes às identificadas neste estudo.

## REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: projeto de estruturas de concreto: procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7584/2012. Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão— Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575-2: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais**. Rio de Janeiro, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C876 – 15: standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete**. West Conshohocken, Pennsylvania, 2015.

ANDRADE, Gabriela Mendes Romero de. **Avaliação do desempenho da precisão de diferentes equipamentos para realização dos ensaios não destrutivos de pacometria**. Trabalho de conclusão de curso. Centro universitário de Brasília UniCEUB, Brasília: 2017, 45 p.

ANDREUCCI, R. **Aplicação Industrial Ensaio por Ultrassom, Maio 2014**. Abendi- Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, 2014.

ACI Committee 228. **Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures**. American Concrete Institute Report, Farmington Hills, Michigan, 1998.

ALEXANDER, Mark; BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Durability of concrete: Design and construction**. CRC Press, 2017.

BAUER, R. J. F. **Patologia em revestimentos de argamassa inorgânica**. Simpósio Brasileiro De Tecnologia Das Argamassas, v. 2, p. 321-33, 1997.

BERTOLINI, Luca. **Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção**. São Paulo-SP Oficina de Textos. 2013.

BORGES, Micheline Gonçalves. **Manifestações patológicas incidentes em reservatórios de água elevados executados em concreto armado**. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana-UEFS, Feira de Santana, 2008.

BUNGEY, J. H.; MILLARD, S.G. **Testing of Concrete in Structures**. 3 ed., Champan e Hall, New York, p. 292, 1996.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. 1. ed. Tradução de M. C. Marcondes; C. W. F. dos Santos; B. Cannabrava. São Paulo: Ed. Pini, 1988. 522 p.

CASCUDO, Oswaldo. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. Pini, 1997.

CASTRO, A. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito a carbonatação**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Goiás, 2003.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 14630: products and systems for the protection and repair of concrete, structures – Test methods – determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method**, English version, DIN. Berlin, 2006. 12 p.

DOMICIANO, Luma Lopes de Souza; BARBOSA, Thaís Rodrigues. **Estudo de durabilidade da estrutura de concreto armado em uma estação de tratamento de esgoto: caso de estudo na ETE Parque Atheneu**. 2020. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/616> . Acesso em: 04 de março de 2023.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. 2002. 239f. Dissertação (Doutorado) - Programa de pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

FRANÇA, Clério Bezerra de. **Avaliação de cloretos pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata**. 2011.

FIORITI, Cesar Fabiano et al. **O Caso das Manifestações Patológicas em Pilares de uma Edificação Pública**. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v. 2, n. 3, 2017.

HELENE, Paulo R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Acesso em: 23 fev. 2023.

HELENE, P.; CUNHA, A. C. Q. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. 2001, São Paulo. 17. Boletim Técnico, Escola Politécnica da USP, São Paulo.

HELENE, Paulo. **Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo, Red Rehabilitar, 2003.

HELENE, P. R. L. **Manual Prático para Reparo e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: PINI, 1992.

MALHOTRA, V. Mohan; CARINO, Nicholas J. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. CRC press, 2004.

MEDEIROS, Alisson Gadelha de. **Análise de durabilidade da ponte do Rio do Carmo utilizando ensaios não destrutivos, norma DNIT e a metodologia GDE/UNB**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MEHTA, Povindar K.; MONTEIRO, Paulo JM. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. IBRACON, 2008.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

NORONHA, Juliana Gomes. **Estudo multicaso de manifestações patológicas em reservatórios de concreto armado na cidade de Tabuleiro do Norte-CE**. 2018.

PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. **Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation**. *Materials and structures*, v. 25, p. 293-304, 1992.

PATIL, Swati et al. **Experimental Analysis of Strength of Concrete using Destructive and Non-Destructive Testing**. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, v. 8, p.1290-1292, 2019.

SALIBA, G. C. L.; CARVALHO JÚNIOR, A. N. DE. **Estudos das Manifestações Patológicas Encontradas em Edifícios de Belo Horizonte e Nova Lima com até 30 Anos de Idade**. In: XX COBREAP - Congresso Brasileiro de Engenharia de Avaliações e Perícias, 2019, Salvador. Anais do XX COBREAP - Congresso Brasileiro de Engenharia de Avaliações e Perícias. Salvador: IBAPE/BA, 2019. p. 1-20.

SANTANA, Gabrielle Alves. **Levantamento de manifestações patológicas em reservatórios de concreto armado no município de Alegrete/RS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.

SILVA, Paulo Fernando A. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1995. 152 p. ISBN 85- 7266- 043- 7.

SILVA, Valdirene Maria. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**. 2007. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. doi:10.11606/T.18.2007.tde-19032007-100952. Acesso em: 2023-03-01.

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

TINOCO, Hênio Fernandes da Fonseca; MORAIS, Arthur Silva de. **Reservatórios em concreto armado: principais manifestações patológicas, diagnóstico e soluções para reabilitação e reforço**. In: IX Congresso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras. João Pessoa. 2013.

UEMOTO, Kai Loh. **Patologia: Danos causados por eflorescência**. Tecnologia de Edificações, São Paulo. Pini, IPT–Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Coletânea de trabalhos da Div. de Edificações do IPT, p. 561-64, 1988.