

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

José Augusto Barcelos Gomes

**ESTUDO DOS PRINCIPAIS MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DAS
ESTRUTURAS DE CONCRETO E SUAS MANIFESTAÇÕES
PATOLÓGICAS**

Santa Maria, RS

2021

José Augusto Barcelos Gomes

**ESTUDO DOS PRINCIPAIS MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DAS
ESTRUTURAS DE CONCRETO E SUAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade
Federal de Santa Maria, como requisito parcial
para a obtenção do título de **Bacharel em
Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. ° Dr. ° Alexandre Silva de Vargas

Santa Maria, RS
2021

José Augusto Barcelos Gomes
ESTUDO DOS PRINCIPAIS MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DAS
ESTRUTURAS DE CONCRETO E SUAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade
Federal de Santa Maria, como requisito parcial
para a obtenção do título de **Bacharel em**
Engenharia Civil.

Aprovado em 27 de agosto de 2021

Alexandre Silva de Vargas, Prof. Dr. (UFSM)
(Orientador)

Rogério Cattelan Antochaves de Lima, Prof. Dr. (UFSM)

André Lübeck, Prof. Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2021

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, a todos os meus familiares que sempre estiveram ao meu lado durante esta importante etapa da minha vida, sempre me dando forças para que eu pudesse seguir em frente e pudesse acreditar que era capaz de alcançar todos os meus objetivos. A vocês meu eterno muito obrigado!

A todos os meus amigos, que estiveram ao meu lado e sempre me apoiaram durante a graduação. Obrigado pelo apoio.

A todos os amigos que fiz em sala de aula, que me acompanharam nessa trajetória, agradeço pelo companheirismo, pelos bons e maus momentos que passamos. Fica o meu muito obrigado!

Ao meu orientador, Alexandre Silva de Vargas, que aceitou me orientar na produção deste trabalho.

Meu profundo agradecimento à Universidade Federal de Santa Maria e a todos os seus servidores, que me proporcionaram um ensino de qualidade e me fizeram evoluir como ser humano. Deixo também, o meu obrigado a todos os meus professores que foram essenciais nesta minha trajetória.

“A melhor maneira de prever o futuro é criá-lo”.

(Peter F. Drucker)

RESUMO

ESTUDO DOS PRINCIPAIS MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO E SUAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

AUTOR: José Augusto Barcelos Gomes
ORIENTADOR: Alexandre Silva de Vargas

O Brasil apresentou um PIB de 7,4 trilhões no ano de 2020, sendo que o setor da construção representou 2,9% deste valor e ainda apresenta uma expectativa de crescimento de 4% em 2021. A NBR 15575 estabelece vida útil de projeto (VUP) para estruturas de concreto armado de edificações habitacionais entre 50 e 75 anos, sendo a idade de 50 anos para desempenho mínimo e de 75 anos para atingir o desempenho superior, enquanto que a NBR 6118 estabelece critérios de qualidade do concreto armado a fim de atingir vida útil estabelecida em projeto. Com isso, este trabalho teve como objetivo estudar os principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto, suas manifestações patológicas, diagnósticos e procedimentos de intervenção que visem corrigir ou mitigar os seus efeitos. Obteve-se como resultado que o entendimento destes mecanismos de deterioração, se faz importante para permitir medidas profiláticas nas fases de projeto e execução das estruturas, fazendo com que essas estruturas atendam o desempenho previsto durante sua vida útil de projeto. Conclui-se que a compreensão dos conceitos supracitados, além de contribuir para segurança das estruturas, também tem impacto financeiro, visto que os custos crescem com uma progressão geométrica de aproximadamente 10 quando se compara o custo total de uma estrutura adequada ainda em fase de projeto, o custo caso a intervenção ocorra na fase de execução e o custo caso seja necessária a intervenção após a manifestação patológica.

Palavras-chave: Manifestações Patológicas. Concreto Armado. Deterioração de Estruturas. Diagnóstico. Construção Civil.

ABSTRACT

STUDY OF THE MAIN MECHANISMS OF CONCRETE DETERIORATION AND ITS PATHOLOGICAL MANIFESTATIONS

AUTHOR: José Augusto Barcelos Gomes

GUIDELINE: Alexandre Silva de Vargas

Brazil had a Gross Domestic Product (GDP) of R\$7,4 trillion in 2020, being that the civil construction represents 2,9% of it, and presents an expected growth of 4% in 2021. The Brazilian standard NBR 15575 establishes the project lifetime of 50 -minimum performance- to 75 years -superior performance- for reinforced concrete housing buildings structures, meanwhile the NBR 6118 establishes quality criteria in order to achieve it. Aligned to that, this work aimed to study the main concrete damage mechanisms, its pathological manifestation, diagnoses and intervention to correct the effects. Understanding these mechanisms is important to allow prophylactic measures in the design and execution stages and then avoid or mitigate future pathological manifestation in the structures. The comprehension of the concepts mentioned above not only contribute for the safety of the structure but also has a financial impact, since the investment cost grows with a geometric progression of approximately 10 when comparing the total cost of a well-designed structure, the cost of an intervention during the execution and the cost of the intervention after the pathological manifestation.

Key-words: Pathological manifestation. Reinforced concrete. Structural deterioration Diagnosis. Civil construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Frequência das origens das manifestações patológicas de edificações.....	23
Figura 2- Interações no concreto	24
Figura 3 - Manchas brancas na estrutura, causadas pela lixiviação	27
Figura 4 - Fissuras causadas pelo ataque de sulfatos.....	29
Figura 5 - Canal de concreto atacado por íons sulfato	30
Figura 6 - Pilar deteriorado por ataque de sulfatos.....	30
Figura 7 - Desenvolvimento da reação álcali-agregado.....	32
Figura 8 - Microscopia mostrando as fissuras da reação álcali-agregado	33
Figura 9 - Fatores preponderantes para ocorrência da reação álcali-agregado.....	34
Figura 10- Reação álcali agregado em blocos de fundação de edifícios em Recife-Pe	34
Figura 11 - Processo de Carbonatação do Concreto.....	39
Figura 12 - Avanço da frente de carbonatação	40
Figura 13 - Solução de fenolftaleína aplicada em corpo de prova de concreto após rompimento por compressão diametral.....	41
Figura 14 - Avanço da carbonatação, indicada por teste químico via fenolftaleína.....	42
Figura 15 - Processo de penetração dos íons cloreto no interior do concreto armado	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes de agressividade ambiental.....	13
Quadro 2 - Termos gerais do estudo da patologia das construções e exemplos.....	20
Quadro 3 - Principais fatores que condicionam a velocidade de penetração da frente de carbonatação	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.....	14
Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e o cobrimento nominal.....	14
Tabela 3 - Vida útil de projeto (VUP) mínima para várias normas.....	15
Tabela 4 - Análise percentual das causas de problemas patológicos em estruturas de concreto	24
Tabela 5 - Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição.	45
Tabela 6 - Teor máximo de íons cloreto para proteção da armadura	47

LISTA DE ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAGED	Cadastro Geral de Empregados e Desempregados
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MPa	Megapascal
NBR	Normas Brasileiras
pH	Potencial hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
RAA	Reação álcali-agregado
VUP	Vida Útil de Projeto
CO ₂	Dióxido de carbono
CaO	Óxido de cálcio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
H ₂ O	Água
CaSO ₄	Sulfato de cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
Na ₂ O	Óxido de sódio
K ₂ O	Óxido de potássio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CaCl ₂	Cloreto de cálcio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	16
1.2	Objetivo Geral	16
1.1.1	Objetivos Específicos	17
1.3	JUSTIFICATIVA	17
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	18
2.1.1	Origem e Conceitos	18
2.1.2	Profilaxia	20
2.1.3	Anamnese	20
2.1.4	Diagnóstico	20
2.1.5	Prognóstico	21
2.1.6	Terapia	21
2.1	PRINCIPAIS MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO, SUAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E POSSÍVEIS CONSERTOS/REPAROS/REFORÇOS A SEREM REALIZADOS	22
2.2.1	Lixiviação	26
2.2.1.1	<i>Diagnóstico</i>	27
2.2.1.2	<i>Profilaxia</i>	27
2.2.1.3	<i>Terapia</i>	27
2.2.2	Expansão por Sulfatos	28
2.2.2.1	<i>Diagnóstico</i>	30
2.2.2.2	<i>Profilaxia</i> ..	30
2.2.2.3	<i>Terapia</i>	31
2.2.3	Reação álcali-agregado (RAA)	32
2.2.3.1	<i>Diagnóstico</i>	36
2.2.3.2	<i>Profilaxia</i>	37
2.2.3.3	<i>Terapia</i>	38
2.2.4	Despassivação por carbonatação	38
2.2.4.1	<i>Diagnóstico</i>	41
2.2.4.2	<i>Profilaxia</i>	43
2.2.4.3	<i>Terapia</i>	44
2.2.5	Ataques por cloretos	44
2.2.5.1	<i>Diagnóstico</i>	47
2.2.5.2	<i>Profilaxia</i>	48
2.2.5.3	<i>Terapia</i>	48
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

Um dos setores com maior capacidade de mudar e acelerar o crescimento de um país, gerando empregos e melhorando a sua infraestrutura, é o setor da construção civil. Segundo a Agência IBGE Notícia (2021), no ano de 2020, devido à pandemia, o PIB do país registrou queda de 4,1%, sendo o maior recuo anual da série iniciada em 1996, e o PIB do setor da construção civil encolheu 7,0%. Entretanto, as projeções para o ano de 2021 são positivas, já que o setor da construção apresenta uma expectativa de crescimento de 4% em 2021 (AGÊNCIA BRASIL, 2020).

No Brasil, 80 % das obras são executadas pelo sistema estrutural de concreto armado. Esse sistema é utilizado em obras de edifícios multifamiliares, de infraestrutura, e outros segmentos da construção civil, possuindo vantagens e desvantagens, como todo sistema construtivo (AMBROZEWICZ, 2012).

O concreto já foi considerado um material praticamente eterno, de modo que, até o final de década de 1990, muitas normas e regulamentos referentes ao projeto e à execução de estruturas de concreto foram concebidos com a preocupação dominante de garantir a obtenção da mais adequada resistência mecânica para as diversas peças estruturais (SOUZA; RIPPER, 1998). Tal afirmação explicita o que havia sido introduzido, que a durabilidade das estruturas era pouco enfatizada. Atualmente, a NBR 6118 – Estruturas de concreto armado – Procedimento (ABNT, 2014), demonstra alguns procedimentos em relação à durabilidade de estruturas de concreto armado e estabelece, principalmente, os aspectos de qualidade do concreto. Durante a elaboração do projeto, deve-se considerar alguns parâmetros em relação à qualidade, visando a durabilidade da estrutura, sendo eles o cobrimento das armaduras e a classe de resistência mecânica do concreto.

A ABNT NBR 15575-2013- Edificações Habitacionais – Desempenho, que entrou em vigor em julho de 2013 e em maio de 2021 foi encerrada uma consulta nacional para atualização das partes referentes ao conforto acústico, é constituída por uma série de exigências, relativas à segurança, habitabilidade e sustentabilidade, sendo esta última responsável pelos itens de durabilidade e manutenibilidade. Em relação ao item de manutenibilidade, será abordado mais detalhadamente no presente trabalho a manutenção corretiva. Segundo Bolina, Helene e Tutikian (2019), a manutenção corretiva é a aquela intervenção que visa corrigir um elemento ou sistema no qual se observa a incidência de falha ou desempenho menor que o esperado.

Busca-se realizar reparo ou substituição do elemento deficiente, com objetivo de restabelecer a plena funcionalidade e segurança que lhe fora admitido em projeto.

No que tange à qualidade do concreto de cobrimento, a Norma Técnica NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece uma relação entre o ambiente de exposição do concreto e a sua qualidade, conforme apresentado na Tabela 1, na qual é possível observar a classe de agressividade, classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto e o risco de deterioração da estrutura.

Quadro 1- Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana (a,b)	Pequeno
III	Forte	Marinha (a)	Grande
		Industrial (a,b)	
IV	Muito Forte	Respingos de maré	Elevado
<p>a - Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).</p> <p>b – Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.</p> <p>c – Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.</p>			

Fonte: ABNT NBR 6118:2014

Com a da determinação da classe de agressividade ambiental, pode-se determinar a partir da Tabela 1, a relação água/cimento máxima e a classe de resistência do concreto.

Tabela 1- Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto (a)	Tipo (b,c)	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,65	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≤ C20	≤ C25	≤ C30	≤ C40
	CP	≤ C25	≤ C30	≤ C35	≤ C40

a – O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

b – CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

c – CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014

A partir da classe de agressividade ambiental, determina-se o cobrimento nominal da estrutura, através da Tabela 2.

Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e o cobrimento nominal

Tipo de Estrutura	Componente ou Estrutura	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
		Cobrimento Nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje (b)	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Elementos Estruturais em contato do solo (d)	30		40	50
Concreto Protendido	Laje	25	30	40	50
	Viga/Pilar	30	35	45	55

a – Cobrimento nominal das bainhas ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

b – Para a face superior de lajes e vigas serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta tabela podem ser substituídas pelas de 7.4 e 7.5, respeitando um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

c – Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

d – No trecho dos Pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014

As tabelas apresentadas (1, 2 e 3) orientam os projetistas estruturais a elaboração de projetos em concreto armado com melhor qualidade e maior durabilidade, elevando o potencial da estrutural atingir a vida útil de projeto (VUP) estabelecida tanto em projetos habitacionais quanto em projetos especiais.

A ABNT NBR 15575:2013 estabelece vida útil de projeto (VUP) mínima para estruturas de concreto armado variando entre 50 e 75 anos, sendo a 50 anos para desempenho mínimo e 75 anos para atingir o desempenho superior.

Segundo Helene (1997), considerando obras de artes, como pontes e obras de arte permanente poderão ser adotados períodos de 50, 75 ou até superiores a 100. A Tabela 3, apresenta a vida útil de projeto (VUP) mínima de algumas normas estrangeiras, para obras de arte especiais.

Tabela 3 - Vida útil de projeto (VUP) mínima para várias normas

Tipo de Estrutura	Vida útil de projeto (VUP) mínima				
	BS 7543 (1992)	ISO 2394 (1998)	Fib 34 (2006) e EN 206-1 (2007)	NBR 15575 (2013)	Fib 53 (2010)
Edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil	≥ 120 anos	≥ 100 anos	≥ 100 anos	-	≥ 120 anos

Fonte: Possan e Demoliner – adaptado (2014).

A deterioração de uma estrutura pode se dar por desgaste de algum de seus componentes ao longo do tempo e/ou acidentes, sendo eles providos pela imperícia humana ou desastres naturais. Para Cánovas (1988), a resistência e a durabilidade de uma estrutura vão depender dos cuidados que se tenham com ela não apenas durante sua gestação, que seriam suas fases de planejamento e projetos, mas também durante seu crescimento, que caracteriza a fase de sua execução e, posteriormente, com sua manutenção ao longo da vida útil.

Segundo Andrade e Silva (2005), os consumidores da construção civil, públicos e privados, têm sofrido com a falta de durabilidade das estruturas de concreto armado. Edifícios comerciais e residenciais, de pequeno e grande porte, pontes, viadutos, túneis, obras hidráulicas, no Brasil e em todo mundo, com alguns anos de vida, podem apresentar manifestações patológicas relacionadas com uma ou mais formas de deterioração do concreto armado. O maior problema não está relacionado às manifestações patológicas em si – pois elas são inevitáveis

com o envelhecimento das estruturas – e sim à idade em que estão surgindo. Muitas vezes, com menos de 20 anos as estruturas já necessitam de manutenções corretivas generalizadas para prolongar sua vida útil.

Machado (2002) escreve que, para um melhor entendimento da deterioração das estruturas, deve-se fazer uma análise, desses fatores explicitados pelo autor, “as manifestações patológicas; os vícios construtivos; as origens dos problemas; os agentes causadores dos problemas; o prognóstico para a terapia, os erros de projeto”.

O entendimento das manifestações patológicas em estruturas de concreto é de fundamental importância para que o projetista possa tomar medidas, ainda em fase de projeto, que visem retardar o aparecimento das mesmas. Em um estudo da recuperação de pilares do subsolo de um edifício, Oliveira et al. (2007) concluiu que o valor de investimento para evitar/reparar as manifestações patológicas cresce com uma progressão geométrica de aproximadamente 10 quando se compara o custo total de uma estrutura adequada ainda em fase de projeto, em que o projetista adota medidas profiláticas, com o custo caso a intervenção seja adotada na fase de execução da obra, com alterações do projeto inicial, e com o custo para a intervenção após a manifestação patológica. Portanto, se o projeto foi realizado adequadamente, o custo total da estrutura terá um valor fixo; se no projeto não foram tomadas medidas profiláticas, o custo da estrutura para implantá-las na fase de execução será de 9,3 vezes maior que o valor fixado; por fim, caso o projeto e a execução da estrutura não apresentem medidas profiláticas, as manifestações patológicas, quando aparecerem, irão fazer com que o custo total da estrutura seja de 94,17 maior que o valor fixado, considerando o custo de execução da mesma e posteriormente os custos de recuperação.

Dada a importância do tema, o presente trabalho irá abordar os principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto, suas manifestações patológicas, diagnósticos e processos para a recuperação das estruturas.

1.1 OBJETIVOS

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral estudar os principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Descrever a(s) manifestação(ões) patológica (s) para cada mecanismo de deterioração.
- Discorrer sobre os diagnósticos e maneiras de recuperação em relação às manifestações patológicas.

1.3 JUSTIFICATIVA

O presente estudo tem o intuito de demonstrar a importância do estudo dos principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto e suas manifestações patológicas, pois muitas das manifestações patológicas apresentadas poderiam ser evitadas a partir de maior controle no processo executivo das obras. Mesmo com o avanço científico e tecnológico aplicado na engenharia civil, manifestações patológicas são identificadas nas estruturas de concreto muito antes da VUP prevista, o que demonstra necessidade de maior atenção, seja no projeto ou na execução.

Patologia das Estruturas não é apenas um campo no aspecto da identificação e conhecimento das anomalias, mas também no que se refere à concepção e ao projeto das estruturas, e, mais amplamente, à própria formação do engenheiro civil. O que ocorre é que todo o aprendizado da engenharia de estruturas tem sido feito, em nível de projeto e execução, pela abordagem das estruturas novas a serem construídas. Assim, a necessidade de reabilitar e manter estruturas novas, ditada por razões tão diversas quanto as de fundo econômico, social, patrimonial ou histórico, está criando uma nova escola no que respeita à concepção e ao projeto estrutural, em que a avaliação do que já existe, em termos de capacidade de desempenho futuro (segurança, servicibilidade e vida útil), tornou-se um dado fundamental (SOUZA; RIPPER, 1998).

Dada a relevância deste tema, o presente trabalho se justifica por apresentar as principais manifestações patológicas das estruturas de concreto, seus agentes causadores, diagnósticos e medidas de recuperação da estrutura, atentando para o fato que tal assunto dever ser mais difundido no meio da construção civil, de modo que as etapas de projeto e de execução também não se preocupem somente com a resistência mecânica das peças estruturais, mas também objetivem a durabilidade das estruturas de concreto.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em quatro capítulos que estão descritos abaixo:

O capítulo 1 consta de uma introdução que explicita conceitos normativos a respeito da vida útil e da durabilidade das estruturas e dos objetivos deste trabalho.

O capítulo 2 consiste em uma revisão bibliográfica referente ao tema, explicando os principais conceitos e também as principais manifestações patológicas em estruturas de concreto, junto de possíveis medidas profiláticas e intervenções para recuperação da estrutura.

O terceiro capítulo aborda as considerações finais e conclusões a respeito do tema.

O capítulo 4 apresenta as referências bibliográficas que foram utilizadas como base para elaboração deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Neste item serão apresentados a origem e conceito da Patologia das estruturas de concreto armado.

2.1.1 Origem e Conceitos

A palavra patológica deriva das duas palavras gregas: páthos e logos. A primeira significa sofrimento ou doença; a segunda, significa estudo. Portanto, patologia pode ser entendida como estudo das doenças ou enfermidades. É possível estabelecer uma definição para o termo patologia das construções, a qual seria a área da engenharia responsável por investigar as manifestações patológicas possíveis de ocorrerem em uma construção (CAPORRINO, 2018, p.12).

Designa-se genericamente por PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS o campo da Engenharia das Construções que se ocupa do estudo das origens, formas de manifestação, consequências e mecanismos de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas (SOUZA; RIPPER, 1998).

Grandiski (1995), percebeu que, da mesma forma que um ser vivo, a “saúde” das edificações dependia não só dos cuidados durante sua “gestação” (fase de projeto), mas também

durante seu “crescimento” (fase da construção) e deveriam permanecer durante o “resto da vida” (fase de manutenção), sob pena de adquirir “doenças” (manifestações patológicas). À

medida que “envelhecem” (fase de degradação), elas podem passar por enfermidades (processo lento e contínuo de deterioração).

Pode-se correlacionar a patologia das construções com a patologia da área da medicina, tais correlações no Quadro 2.

Quadro 2- Termos gerais do estudo da patologia das construções e exemplos

(conclusão)

Termos	Definição	Patologia das Construções	Patologia Médica
Manifestação Patológica	São problemas visíveis ou observáveis, indicativos de falhas do comportamento normal	Fissuras, trincas * manchamentos, deformações, mofo	Dor de cabeça, enjoo, tontura
Fenômeno	É a raiz do problema, na qual se deve focar para a solução	Corrosão, eflorescência, recalque	Câncer, depressão
Inspeção	É o check-up, quando o patólogo ou médico avalia o seu paciente, aprovando a condição ou solicitando novos exames ou ensaios.	Avaliar a estrutura regularmente ou quando houver um fato extraordinário de interesse	Avaliar a pessoa para saber a condição atual de saúde
Anamnese	É o estudo dos antecedentes; nessa etapa, deve-se escutar dos usuários e pacientes o que estão sentindo	Conversa com o síndico e moradores antigos, análise de projeto, verificação do estado dos prédios vizinhos	Análise do histórico do paciente e dos familiares, verificação de exames anteriores
Ensaio não destrutivo	São ensaios/exames que não danificam o paciente	Esclerometria, pacometria, ultrassom	Medição de pressão e febre, ultrassom
Ensaio semidestrutivos	São ensaios/exames que causam pequeno dano ao paciente	Extração de corpos de prova, pull-out	Medição de pressão e febre, ultrassom
Diagnóstico	É a explicitação e o esclarecimento das origens, mecanismos, sintomas e agentes causadores do fenômeno ou problema patológico	Corrosão, eflorescência, recalque	Câncer, depressão
Profilaxia	São as medidas preventivas para que o problema não ocorra	Manter cobertura correto das armaduras, fazer o uso adequado da construção, manter a pintura da fachada íntegra.	Escovar os dentes cinco vezes ao dia, manter uma alimentação saudável, praticar exercícios

(conclusão)

Termos	Definição	Patologias da construção	Patologia médica
Prognósticos	É a análise da progressão da enfermidade, se nada for feito para erradicá-la	Aumento da fissuração, deformação excessiva, colapso	Perda da visão, expansão do câncer para outros órgãos, morte
Terapia	São as medidas para neutralizar o fenômeno, devolvendo o desempenho ou a qualidade de vida ao paciente. É o estudo das intervenções correlativas viáveis	Refazer elemento corroído com proteção da armadura, retirar sobrecarga, reforçar estruturas	Escovar os dentes cinco vezes ao dia, manter uma alimentação saudável, praticar exercícios

Fonte: Tutikian et al. (2019)

*As aberturas são classificadas de acordo com sua espessura, sendo: fissura uma abertura com espessura de 0,2 a 0,5mm; trinca uma abertura com espessura de 0,5 a 1,5mm; rachadura uma abertura com espessura de 1,5 a 5mm; fenda uma abertura com espessura de 5 a 10mm; brecha uma abertura com espessura maior que 10mm (Escola de Serviço Público do Estado do Espírito Santo, 2016).

Dada a importância dessa área da engenharia, é muito importante analisar e manipular esses dados, visando um melhor desempenho das estruturas que já existem e as que ainda serão construídas.

2.1.2 Profilaxia

Destaca-se a profilaxia (do grego *prophylaxis*, que significa cautela) como sendo o conjunto de medidas adotadas para evitar o surgimento de um problema patológico em uma edificação. São medidas preventivas implementadas antes que qualquer processo patológico surja (BOLINA; HELENE; TUTIKIAN, 2019).

A profilaxia, como exemplo, pode-se citar a adoção do cobrimento de concreto em um elemento estrutural de concreto armado, visto que o cobrimento irá proteger a armadura da corrosão.

2.1.3 Anamnese

A anamnese é o levantamento do histórico da construção, método que faz uso de entrevistas com usuários, construtores e projetistas da edificação, mostrando-se uma maneira altamente humana e empírica de análise do problema e pré-diagnóstico (DO CARMO, 2003).

2.1.4 Diagnóstico

O diagnóstico é a atividade de identificação do mecanismo, processo ou agente que originou uma anomalia, partindo das fontes que deflagraram o fenômeno. Para cumprir com esse objetivo, é necessário que sejam feitas análises e coletadas informações suficientemente capazes de conduzir o profissional a conclusões seguras, as quais contribuam na identificação da medida corretiva mais adequada para o problema (BOLINA; HELENE; TUTIKIAN, 2019).

É de suma importância que o diagnóstico seja feito de forma criteriosa e eficiente, pois caso contrário, serão feitas medidas corretivas inadequadas, causando um gasto desnecessário e podendo comprometer ainda mais a estrutura. De acordo com Andrade e Silva (2005), o diagnóstico só poderá ser efetuado após a conclusão das etapas de levantamento e análise. Devem-se investigar as causas da patologia, realizando um diagnóstico preciso para que a recuperação seja efetiva. É importante investigar cuidadosamente a patologia e suas possíveis causas, pois ao se falhar no seu diagnóstico, a correção não será eficiente. Como afirmado por Tutikian e Pacheco (2013), “nunca há a certeza em um diagnóstico, cuja eficácia só poderá ser confirmada pela resposta eficiente do sistema tratado”; portanto, além de realizar um diagnóstico criterioso deve-se monitorar a resposta do sistema tratado.

2.1.5 Prognóstico

Antes de realizar a intervenção, e para efeitos de análise técnica e econômica, alguns patólogos realizam uma previsão do que pode ocorrer caso não haja intervenção na anomalia. Essa previsão, que é o estudo das características evolutivas de uma manifestação patológica, chama-se prognóstico (BOLINA; HELENE; TUTIKIAN, 2019). O prognóstico é importante pois o mesmo fornece subsídios para uma análise de custo-benefício da intervenção na estrutura.

2.1.6 Terapia

A terapia só terá êxito e atenderá as demandas de recuperação de desempenho da estrutura, se previamente for feito um diagnóstico eficiente, caso contrário a medida corretiva será ineficaz, desperdiçando tempo e dinheiro. O fator econômico se faz muito relevante nesse processo, de acordo com Cánovas (1988), o fator é um condicionante de bastante peso na hora de decidir sobre a necessidade e urgência de iniciar a intervenção e, inclusive, sobre a forma de realizá-la dentro da máxima eficácia exigida. Um diagnóstico errôneo culminará em um gasto

de desnecessário de recurso, visto que a doença – estando ainda instalada na peça – irá retornar ao quadro patológico existente antes da intervenção.

As medidas terapêuticas de correção têm como destaque o uso de concreto e argamassa, já que as estruturas de concreto, naturalmente, seriam em sua maioria sãs, se bem projetadas e convenientemente executadas (SOUZA; RIPPER, 1998).

De acordo com Bolina, Helene e Tutikian (2019), o processo de intervenção de um elemento ou sistema pode se dar sob diferentes formas. Uma vez decidido o tipo de terapia que será adotado para a correção do problema, um projeto deverá ser realizado. O tipo de terapia a ser empregado em um sistema está condicionado a diversos fatores, como estética, segurança, funcionalidade, execução, mão de obra, disponibilidade de materiais, execução, mão de obra, disponibilidade de materiais, custo, e até mesmo familiaridade do profissional com o método.

As intervenções necessárias para restituir o desempenho da estrutura devem ser aplicadas quando a própria se apresenta de forma insatisfatória, devem-se expor alternativas para que seja possível reparar, recuperar, reforçar, ou ainda, no caso mais extremo, decretar a falência da estrutura e demolir. Antes de qualquer intervenção em uma estrutura afetada é essencial determinar qual a melhor estratégia a ser utilizada no caso estudado. O tipo da intervenção vai depender de como a manifestação patológica está apresentada. Para haver uma correta seleção da alternativa de intervenção conforme o nível dos agravos e a disponibilidade de materiais na região onde está inserida a edificação deve haver a análise do tipo de terapia a ser adotada (MOREIRA, 2006).

Dentre os tipos de intervenção, a reabilitação visa trazer de volta as condições iniciais de segurança e desempenho de uma estrutura. Os serviços de reforço, segundo Souza e Ripper (1998), sempre requerem a elaboração de projeto estrutural, que podem ter origem na necessidade de alterar a funcionabilidade da estrutura – como o aumento da carga de utilização – ou na danificação sofrida pela mesma, sendo que neste caso o reforço seria uma etapa da recuperação da estrutura. Para Cánovas (1988), uma série de precauções devem ser estabelecidas para o reforço. Como essa terapia geralmente é aplicada para sistemas estruturais, medidas de segurança devem ser adotadas para a execução do trabalho terapêutico. A adoção de um projeto de escoramento adequado, o planejamento de todo o processo a fim de não sobrecarregar determinados elementos, a preservação das instalações existentes e o cuidado com os elementos sadios.

Conforme Bolina, Helene e Tutikian (2019), reforma é o conjunto de métodos e atividades pelo qual se estabelecem uma nova forma e condições de uso a uma edificação. A reforma não possui compromisso com valores históricos, estéticos, formais ou arquitetônicos,

ressalvados os aspectos técnicos e físicos de habitabilidade das obras que norteiam determinada ação.

No Brasil as reformas são regulamentadas pela NBR 16280 (ABNT, 2014c). A própria norma define reforma, como sendo “Qualquer alteração nas condições da edificação com o objetivo de recuperar, melhorar ou ampliar suas condições de habitabilidade, uso ou segurança, e que não seja manutenção. Isso vale mesmo que não aconteça mudança de função, ou seja, que o espaço alterado não passe a ser usado para outro fim”.

2.2 PRINCIPAIS MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO, SUAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E POSSÍVEIS CONSERTOS/REPAROS/REFORÇOS A SEREM REALIZADOS

Após verificar a manifestação patológica na estrutura, é necessário efetuar uma vistoria detalhada e planejada a fim de determinar a real condição da estrutura, avaliar as anomalias existentes, suas causas e então definir os métodos a serem adotados para recuperação ou reforço (SOUZA; RIPPER, 1998).

Para toda a causa da deterioração existe um ou mais agentes atuantes que, por meio de mecanismos de deterioração, interagindo com o concreto e o aço, reduzem assim gradativamente o desempenho da estrutura (ANDRADE, 2005 apud SANTOS, 2012).

Como citado anteriormente, as manifestações patológicas surgem devido a deterioração da estrutura. A ABNT NBR 6118:2014 prevê que os mecanismos de deterioração das estruturas de concreto, podem ser:

- Mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto:
 - Lixiviação;
 - Expansão por sulfato;
 - Reação álcali-agregado.

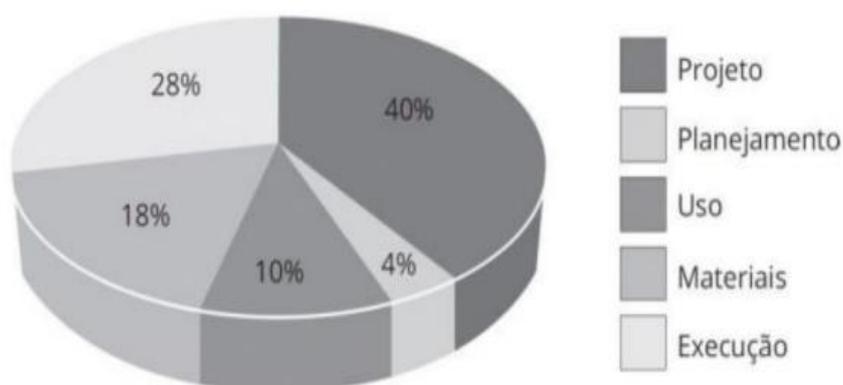
- Mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura:
 - Despassivação por carbonatação;
 - Despassivação por ação de íons cloreto.

Para Do Carmo (2003), as manifestações patológicas são as anomalias que ocorrem em uma edificação, podendo aparecer em qualquer etapa da obra e devendo ser tratadas brevemente para não se agravar e causarem maiores danos à construção.

Souza e Ripper (1998) afirmam que o processo de sistematização do estudo da patologia das construções conduz ao estabelecimento de uma classificação preliminar dos problemas ou manifestações patológicas em dois grandes segmentos: os simples e os complexos. As manifestações patológicas simples são as que admitem padronização, podendo ser resolvidas sem que o profissional responsável tenha conhecimento muito especializado de Patologia das Estruturas. As manifestações patológicas complexas requerem uma análise pormenorizada e individualizada do problema, de modo que são exigidos conhecimentos específicos do profissional responsável.

Em relação à origem das manifestações patológicas, Helene (2007) mostra que a mais corriqueira é na etapa de projeto, conforme a Figura 1.

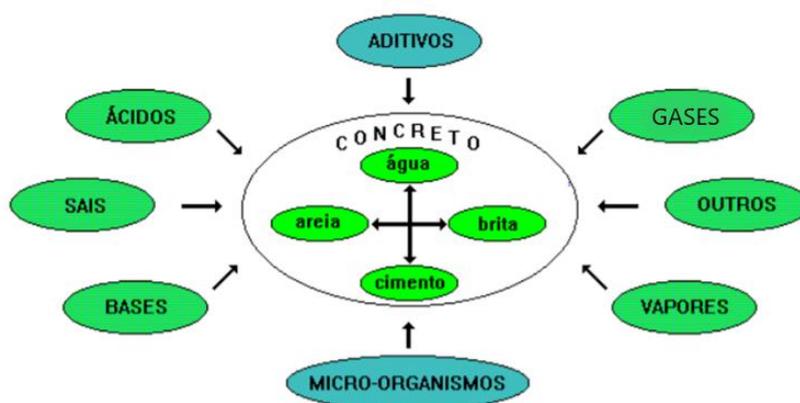
Figura 1- Frequência das origens das manifestações patológicas de edificações



Fonte: Helene (2007).

Segundo Piancastelli (1997), sendo o concreto armado, um material não inerte, ele se sujeita a alterações, ao longo do tempo, devido a interações entre seus elementos constitutivos (cimento, areia, brita, água e aço), interações entre esses e agentes externos (ácidos, bases, sais, gases e outros) e com materiais que lhe são adicionados (aditivos e adições minerais). Na Figura 2, pode-se visualizar as interações que ocorrem no concreto.

Figura 2- Interações no concreto



Fonte: Piancastelli (1997).

Conforme apresentado na Figura 2, percebe-se que o concreto interage com diversos agentes externos, sendo de grande importância entender essas interações a fim de garantir uma maior durabilidade à estrutura.

A Tabela 4 apresenta um estudo de Souza e Ripper (1998) contendo a distribuição das manifestações patológicas nas estruturas de concreto em diversos estudos realizado pelo mundo. Pode-se observar que a causa das manifestações patológicas, que na bibliografia em questão eram chamadas de problemas patológicos, varia em função da localidade analisada.

Tabela 4 - Análise percentual das causas de problemas patológicos em estruturas de concreto

(continua)

Fonte de Pesquisa	Concepção e Projeto	Materiais	Execução	Utilização e outras
Eduardo Grunau Paulo Helene (1992)	44%	18%	28%	10%
D. E. Allen (Canadá) (1979)	55%	49%		-
C.S.T.C (Belgica) Verçoza (1991)	46%	15%	22%	17%
CEB Boletim 157 (1982)	50%	40%		10%
Faculdade de Engenharia da Fundação Armando Álvares Penteado Verçoza (1991)	18%	6%	52%	24%
B.R.E.A.S (Reino Unido) (1972)	88%			12%
E.N.R (USA) (1968 – 1978)	9%	6%	75%	10%
S.I.A (Suiça) (1979)	46%	-	44%	10%
Dov Kaminetzky (1991)	51%	40%		16%

				(conclusão)
Jean Blénot (França) (1974)	35%		65%	
LEMIT (Venezuela) (1965 – 1975)	19%	5%	57%	9%

Fonte: Souza e Ripper (1998).

Segundo Oliveira de Sena et al. (2020), as manifestações de maior incidência em estruturas de concreto armado são as fissuras, bolor, as eflorescências, manchas no concreto aparente, corrosão de armaduras e os vazios de concretagem. Dentre essas, no presente trabalho, serão descritas e ilustradas as principais manifestações patológicas em estruturas de concreto armado (lixiviação, expansão por sulfatos, reação álcali-agregado, carbonatação e ataque por cloretos), o seu diagnóstico, a sua profilaxia e a terapia recomendada.

2.2.1 Lixiviação

A água proveniente da condensação de neblina, vapor ou da chuva, podem conter baixa ou nenhuma concentração de íon de cálcio, conhecidas como águas puras. Então quando essas águas entram em contato com o cimento, a tendência é que ocorra a dissolução dos produtos contendo cálcio ou a hidrólise dessas águas. Como o hidróxido de cálcio, presente no concreto, apresenta grande solubilidade em águas puras, é muito sensível a eletrólise, fazendo com que ocorra a lixiviação. O produto da lixiviação, íons de cálcio, reagem facilmente com CO₂ presente na atmosfera, resultando no aparecimento de crostas brancas de carbonato de cálcio na superfície do concreto, conhecidas como eflorescências. E além da estética indesejável, a lixiviação ainda causa perda de resistência mecânica do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A intensidade da corrosão por lixiviação é proporcional à porosidade do concreto. A dissolução, o transporte e a deposição do hidróxido de cálcio resultam na decomposição de outros hidratos, aumentando assim a porosidade do concreto (SOUZA; RIPPER, 1998).

A consequência mais frequente do ataque ácido é a desintegração da pasta de cimento, devida principalmente à dissolução do hidróxido de cálcio e de magnésio do cimento hidratado. Os principais efeitos são o aumento da porosidade do concreto, a redução da seção resistente da peça, a perda de alcalinidade e a exposição das armaduras ao ambiente agressivo (BOLINA; HELENE; TUTIKIAN, 2019).

A seguir serão apresentados o diagnóstico, a profilaxia e a terapia para a lixiviação do concreto.

2.2.1.1 Diagnóstico

A lixiviação por íons de cálcio se manifesta normalmente, de maneira visual, por meio da formação de eflorescências de coloração esbranquiçada ou estalactites (ESCADEILLAS; HORNAIN, 2014). O diagnóstico da manifestação patológica decorrente da lixiviação se dá por inspeção visual, pois é possível identificar visualmente quando a estrutura estiver com a presença de manchas esbranquiçadas, agregados decompostos e superfície arenosa. A Figura 3, ilustra uma estrutura que está em processo de lixiviação.

Figura 3 – Lixiviação da pasta de cimento.



Fonte: AGUIAR (2011).

A Figura 3 ilustra uma estrutura que está em processo de lixiviação, sendo possível perceber o aspecto esbranquiçado proveniente provavelmente da reação dos íons cálcio com o CO_2 presente na atmosfera.

2.2.1.2 Profilaxia

Segundo Kerkoff (2017), existem algumas maneiras de prevenir o fenômeno de lixiviação no concreto, sendo a dosagem adequada dos materiais na preparação do concreto e a qualidade do mesmo as principais técnicas. Uma redução na relação água/cimento e um bom

adensamento reduzem a permeabilidade do concreto, o que poderá reduzir a ocorrência da lixiviação nesse tipo de peça.

Para Vieira (2017), a lixiviação do concreto pode ocorrer em qualquer tipo de peça de concreto, seja nas recém-executadas ou naquelas com vida útil avançada, a presença de adições, como escórias granuladas de alto forno (EGAF) e pozolanas na mistura, faz com que o hidróxido de cálcio seja consumido e transformado em outros compostos que não sofrem lixiviação.

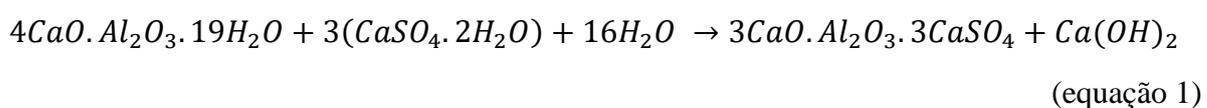
2.2.1.3 Terapia

Segundo de Paula (2021), após uma estrutura ser considerada comprometida, são necessários estudos para determinar se é possível recuperá-la ou se a situação exige a demolição. É papel do projetista especializado em recuperação e reforço estrutural verificar todas as possibilidades.

Porém, para Depizzol (2017), quando a lixiviação está em seu estado inicial, basta realizar a remoção do carbonato de cálcio que ficou na superfície da estrutura, e realizar uma avaliação da peça para ver se não há algum comprometimento estrutural. Para que a restauração seja duradoura, é necessário impermeabilizar a estrutura através de mantas ou aditivos impermeabilizantes para o concreto, caso contrário a causa da eflorescência não será totalmente eliminada (CASA DO CONSTRUTOR, 2018).

2.2.2 Expansão por Sulfatos

Processo físico-químico que se dá pela expansão por ação de águas ou solos contaminados com sulfatos. Segundo Olivari (2003), o sulfato de cálcio, por exemplo, encontrado principalmente em localidades costeiras, reage com o aluminato tricálcio hidratado e forma um sal conhecido como Candlot ou Etringita ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$), conforme demonstrado na equação 1.



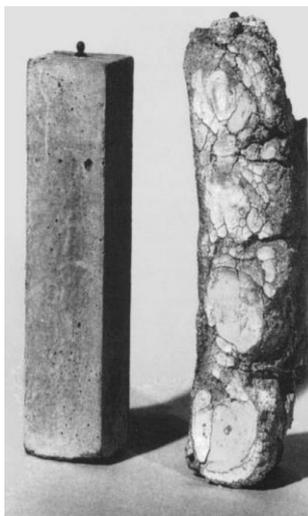
A Etringita possui um coeficiente de expansão de ordem de 300% e o seu mecanismo de ação química favorece o surgimento de fissuras na estrutura, pois acarreta na ocorrência de áreas com coeficientes distintos de expansão (OLIVARI, 2003).

Os sulfatos podem ter origem nos materiais que compõe o concreto ou no contato do concreto com os solos ou águas ricas com este agente. O ataque produzido pelos mesmos é devido a sua ação expansiva, que pode gerar tensões capazes de fissurá-lo. Os sulfatos estão presentes na água de amassamento, nos agregados ou no próprio cimento e podem penetrar desde o exterior por difusão iônica ou por sucção capilar (SILVA, 1998).

Segundo Lapa (2008), esses compostos são potencialmente danosos ao concreto, sendo os sulfatos de sódio e cálcio mais comuns em solos, águas e processos industriais.

A Figura 4 explicita um corpo de prova normal, que não foi atacado por sulfatos e o outro que sofreu ataque por íons sulfato.

Figura 4 - Fissuras causadas pelo ataque de sulfatos



Fonte: CEB (1989)

Percebe-se na Figura 4 o poder deletério das reações referente à expansão por sulfato. A presença de trincas e fissuras em todo o corpo-de-prova indicando a perda de capacidade portante em estruturas que apresentam este tipo de manifestação patológica.

2.2.2.1 Diagnóstico

Segundo Mehta e Monteiro (2014), para haver ataque por sulfato, são necessárias uma fonte de sulfato, a presença de umidade e porosidade do concreto.

O concreto atacado por sulfatos tem uma aparência esbranquiçada característica. É comum a deterioração começar nos cantos e arestas, e é seguida de uma fissuração progressiva e desprendimento de partes que reduzem o concreto a uma condição friável ou mesmo mole (NEVILLE, 2015).

2.2.2.2 Profilaxia

Visando evitar ou minimizar os efeitos danosos que os íons sulfato causam no concreto, pode-se aumentar a resistência do concreto contra o ataque de sulfatos através da redução da relação a/c, com o uso de cimento resistente a sulfatos, com baixo teor de aluminato tri- cálcico, e com a introdução de proporções adequadas de sílica ativa e cinzas volantes (EMMONS, 1993).

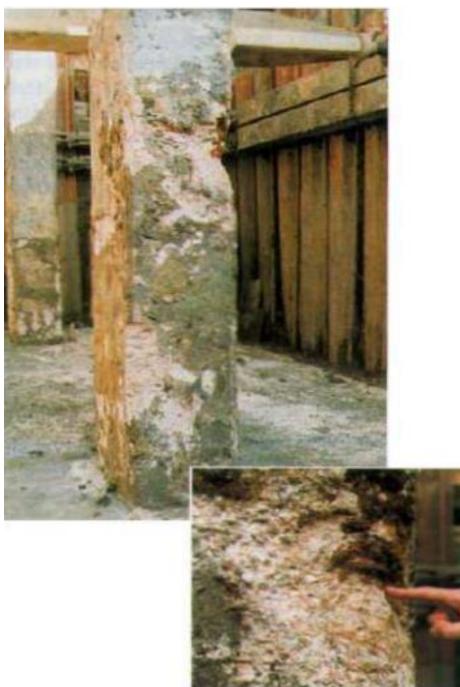
As Figuras 5 e 6 mostram estruturas que sofreram ataques de sulfatos.

Figura 5 - Canal de concreto atacado por íons sulfato



Fonte: Thomaz (2016)

Figura 6 - Pilar deteriorado por ataque de sulfatos



Fonte: Coutinho (2001)

Como apresentado nas Figuras 5 e 6, reações por ataque de sulfatos em estruturas de concreto armado podem levar a danos importantes na estrutura e levá-la ao colapso, caso não sejam realizadas intervenções técnicas em tempo hábil.

2.2.2.3 *Terapia*

De acordo com Reis (2001), o principal objetivo no preparo das superfícies a intervir, sejam elas afetadas por íons sulfatos ou outra patologia, é garantir boas condições de aderência entre a peça existente e o reparo, e o procedimento deve ser feito de maneira a diminuir os possíveis danos ao concreto sadio. A autora indica as lavagens com jatos de água e soluções ácidas ou alcalinas como os métodos mais comuns de limpeza, sendo a utilização de soluções indicada quando manifestação patológica causada por ataque de íons sulfatos no concreto está presente próxima à superfície.

Para o caso de reparos profundos, que atingem profundidades superiores a 5 cm, é necessário remover todo o concreto danificado e então regularizar a superfície sem alisá-la, pois isso afetaria a aderência do material de reparo (SOUZA; RIPPER, 1998).

Segundo Souza e Ripper (1998), para reparos superficiais podem ser utilizadas argamassas, podendo ser constituídas de cimento e areia, polímeros (como adesivo PVA ou acrílico) ou resina epóxi (apresenta elevada resistência mecânica e química, além de uma ótima aderência com concreto e aço). Para os casos em que a extensão da deterioração se estenda para além da armadura, pode-se utilizar concreto comum para realizar o reparo, que deve possuir resistência no mínimo igual ao da estrutura original, possuir granulometria e diâmetro máximo do agregado compatíveis com o serviço e boa trabalhabilidade. Além disso, pode ser necessária a utilização de formas para a realização do reparo.

Nos casos em que há corrosão da armadura, um dos principais problemas ocorre quando apenas parte da armadura é tratada, potencializando o risco de ativação da corrosão após o reparo (REIS, 2001).

De acordo com Andrade (1992), primeiramente deve-se retirar todo o material aderido à superfície das armaduras, geralmente com limpeza através de jatos de areia ou escovas de aço, e após pode-se recobrir o aço com uma fina camada de resina epóxi, utilizar uma proteção catódica através de corrente elétrica ou realizar a galvanização do mesmo; entretanto, o custo da galvanização é muito elevado, tornando-a inviável de realizar.

O ataque por sulfatos possui um grande potencial destrutivo e exige uma terapia que pode ser custosa. Portanto, a melhor maneira de garantir a durabilidade da estrutura é investir na profilaxia.

2.2.3 Reação álcali-agregado (RAA)

A Reação álcali-agregado é uma reação química que ocorre devido à presença de agregados reativos e hidróxidos alcalinos da pasta de cimento hidratada, em presença de umidade. Essa reação é chamada de reação álcali-agregado e possui como consequência a formação de um gel higroscópico que, na presença de umidade, é capaz de se hidratar e aumentar de volume, gerando fissuras e perda de resistência de elementos contaminados. O coeficiente de expansão térmica volumétrico do gel exsudado, determinado para uma variação de temperatura igual a 22 °C (ISAIA, 2011).

As matérias-primas usadas na fabricação do clínquer Portland são as fontes de álcalis no cimento, que normalmente variam de 0,2% a 1,5% de Na₂O equivalente. Com relação aos agregados reativos aos álcalis, dependendo do tempo, da temperatura e das dimensões da partícula, todos os silicatos ou minerais de sílica podem reagir com soluções alcalinas, embora um grande número de minerais reaja em grau insignificante (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

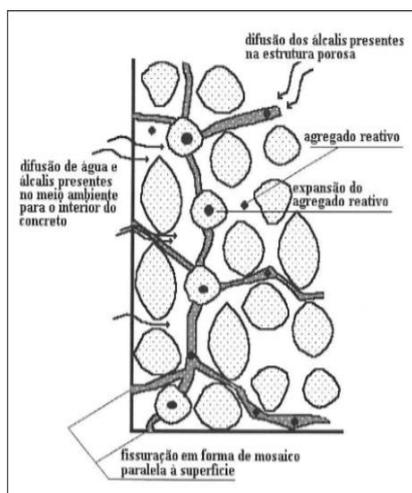
Segundo Santos (2012), a RRA é um fenômeno patológico que ocorre no concreto e que pode desencadear problemas tanto em nível estrutural como operacional. Ela pode ser definida como um termo geral utilizado para descrever a reação química que ocorre internamente em uma estrutura de concreto, envolvendo os hidróxidos alcalinos provenientes principalmente do cimento e alguns minerais reativos presentes no agregado utilizado. O maior problema desta reação química está no fato que ela possui caráter expansivo, acarretando, deste modo, fissuração, que por consequência, aumenta a porosidade do concreto, deixando este mais suscetível à penetração de vários outros elementos.

As matérias-primas usadas na fabricação do clínquer são as fontes de álcalis do cimento. Com relação aos agregados reativos aos álcalis, dependendo do tempo, da temperatura e das dimensões da partícula, todos os silicatos ou minerais de sílica podem reagir com soluções alcalinas, embora um grande número de minerais reaja em grau insignificante (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O concreto sob RAA exhibe em sua superfície fissuração em forma de “mapa”. Uma vez iniciada a fissuração, maior será a penetração de umidade / água no interior do concreto, acelerando ainda mais a reação álcali-agregado e comprometendo as propriedades mecânicas e elásticas do concreto, além de reduzir sua durabilidade (EMMONS, 1993; HASPARYK, 2005).

A Figura 7, demonstra o processo de desenvolvimento da reação álcali agregado no concreto.

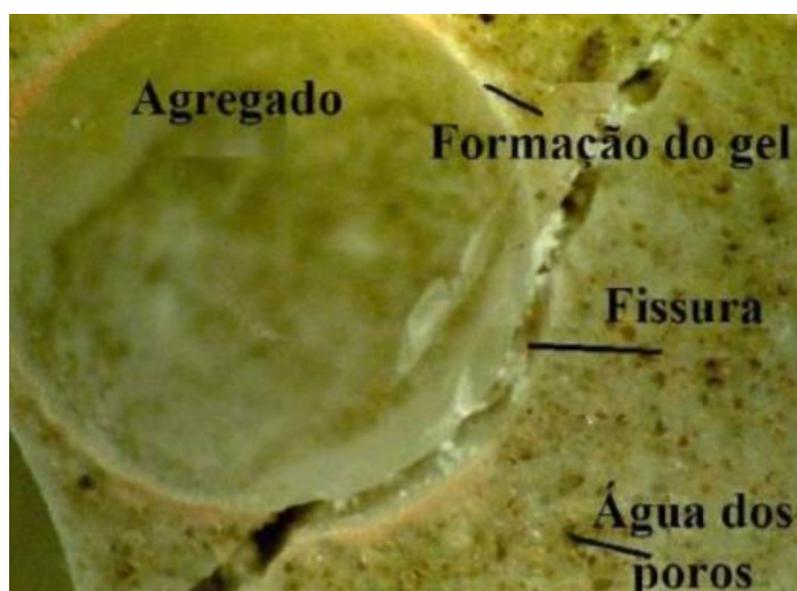
Figura 7 - Desenvolvimento da reação álcali-agregado no concreto



Como pode ser visto na Figura 7, ocorre a difusão dos álcalis presentes no concreto que reagem com o agregado na presença de água, ocasionando a expansão e consequentemente fissuras em forma de mosaico paralelas à superfície.

De acordo com Aguiar (2014) certos tipos de agregados reagem com o potássio, sódio e hidróxido de cálcio reagem com o cimento formando um tipo de gel ao redor dos agregados reativos. Este gel quando exposto a umidades elevadas se expande causando fissuras no concreto, vide Figura 8.

Figura 8 - Microscopia mostrando as fissuras da reação álcali-agregado



Fonte: Aguiar (2014)

O gel formado na reação álcali-agregado pode conduzir ao fissuramento do concreto, como pode ser visto na Figura 8, comprometendo a segurança estrutural do elemento caso não ocorra uma intervenção técnica.

A RAA já foi detectada em diversos países e em várias estruturas, particularmente em áreas úmidas como barragens, pontes e fundações em concreto (ZAMBOTTO, 2014). A Figura 9, a seguir, mostra um como é um ambiente propício para a ocorrência da reação álcali-agregado.

Figura 9 - Fatores preponderantes para ocorrência da reação álcali-agregado



Fonte: Metha e Monteiro (2008 apud Poggiali, 2009).

Em relação a manifestação patológica decorrente da reação álcali-agregado, são fissuras que tendem a se formar paralelamente às barras de armadura. Como ilustra a Figura 10.

Figura 10- Reação álcali agregado em blocos de fundação de edifícios em Recife-Pe



Fonte: SILVA (2007).

Sendo assim, a Figura 10 ilustra a presença de fissuras em todo o bloco da fundação causada por reação álcali-agregado. Neste caso, a presença de umidade próxima ao bloco, somado a agregados reativos e a presença de álcali, potencializou a reação álcali-agregado.

2.2.3.1 Diagnóstico

O diagnóstico da reação álcali-agregado pode ser realizado através de ensaios em laboratórios ou em campo. De acordo com Mizumoto (2009), os métodos laboratoriais permitem verificar a potencialidade reativa do agregado, enquanto que os ensaios em campo permitem verificar a presença da reação álcali-agregado de maneira imediata através de métodos qualitativos. Entre os métodos qualitativos, o autor destaca o método do acetato de uranila, em que o íon uranila forma colorações amarelo-esverdeadas quando aplicado nas regiões afetadas, método do sulfato de cupramônio, o qual indica a presença do gel RAA através de uma coloração azul, e o método da mancha ou colorimétrico, que se baseia no uso dos reagentes cobaltonitrito de sódio e rodamina B base.

Em laboratório é possível determinar a reatividade potencial dos agregados através de ensaios de caracterização físico-química. A ABNT NBR 15577/2018 - Agregados – Reatividade álcali-agregado, especifica os ensaios necessários para avaliar a reatividade potencial dos agregados e está dividida em sete partes:

- NBR 15577-1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto;
- NBR 15577-2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto;
- NBR 15577-3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto;
- NBR 15577-4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado;
- NBR 15577-5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado;
- NBR 15577-6: Determinação da expansão em prismas de concreto;
- NBR 15577-7: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado.

É possível realizar outros ensaios para caracterização das amostras, como granulometria, absorção, massa específica, gravimetria e caracterização mineralógica por difratomia por raios X (DRX) (MIZUMOTO, 2009).

2.2.3.2 Profilaxia

Segundo Munhoz (2007), as principais medidas preventivas contra a RAA são a seleção adequada do agregado, a limitação do teor de álcalis no concreto e o uso de adições ativas. A respeito dos agregados, pode-se realizar os ensaios descritos em 2.2.1.3.1 para identificar a reatividade dos mesmos. O autor indica que podem ser usadas escória de alto-forno, cinza volante, argila calcinada, matacaulim, sílica ativa e cinza de casca de arroz como adições ativas, com os respectivos teores adequados, a fim de evitar ou controlar a expansão deletéria no concreto.

Hasparyk (2005), detalha medidas prevenção para que se não tenha a ocorrência da reação álcali-agregado:

- Estudo preliminar dos agregados a serem empregados na obra, através de análise petrográfica, para identificar os minerais potencialmente reativos presentes;
- Caracterização e análise química do cimento a ser empregado na obra, para verificar o teor de álcalis. Recomenda-se ainda que o teor de álcalis do cimento Portland não seja superior a 0,30%.
- Caracterização e análise química do cimento a ser empregado na obra, para verificar o teor de álcalis. Recomenda-se ainda que o teor de álcalis do cimento Portland não seja superior a 0,30%. De acordo com Magalhães (2011), o teor de álcalis no cimento é expresso como percentual equivalente de Na₂O em massa, conforme equação (2):

$$\%Na_2O_{eq} = \%Na_2O + 0,659K_2O$$

(equação 2)

- Ensaio de laboratório sobre a reatividade da combinação cimento-agregado;
- Empregos de cimentos CP-III e CP-IV. Por apresentarem menor teor de álcalis proveniente do cimento, são pouco reativos;
- Restringir a penetração de água, através de impermeabilização.

Portanto, a análise do agregado sob o aspecto de minerais com potencial reativo é a principal medida para evitar a ocorrência de RAA.

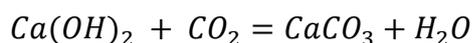
2.2.3.3 Terapia

A recuperação de uma estrutura afetada por RAA é ainda difícil, mas existem maneiras de retardar ou mitigar os seus efeitos. De acordo com Gomes (2008), podem ser realizados tratamentos superficiais por meio de materiais elásticos, como pinturas a base de silano e siloxanos, ou tratamento com gás carbônico (CO₂) e uso de membranas a fim de dificultar o ingresso de umidade no concreto. Além do combate a umidade, é possível realizar reforços estruturais para impedir a livre expansão do concreto, como o aumento das seções de concreto e de armadura ou utilizar protensão. Em casos extremos pode ser necessário realizar a demolição e a reconstrução da estrutura.

Na cidade de Recife, um edifício público de 13 pavimentos, foi um dos casos mais conhecidos de reação álcali agregado no país. A edificação contava com grande parte de seus blocos de fundações afetados pela RAA, foi feito um plano de recuperação para os blocos de fundação do edifício. De acordo Silva (2007), em sua dissertação, ele explicita os procedimentos do plano recuperação da construção supracitada, o processo se dividiu em duas etapas, fechamento das trincas através da injeção de microcimento nas aberturas e posteriormente encapsulamento dos blocos.

2.2.4 Despassivação por carbonatação

Segundo Ferreira (2000), a carbonatação é o processo pelo qual minerais do cimento hidratado reagem com o dióxido de carbono (CO₂) presente na atmosfera, principalmente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), formando o carbonato de cálcio (CaCO₃), conforme demonstrado na equação 3.



(equação 3)

Segundo Souza e Ripper (1998), a carbonatação do concreto ocorre quando o anidrido carbônico (CO₂), que está presente na atmosfera, e se transporta da superfície para o interior do concreto, reagindo com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), presente na pasta de cimento, no meio aquoso, originando o carbonato de cálcio (CaCO₃), como mostra a Equação 3. O

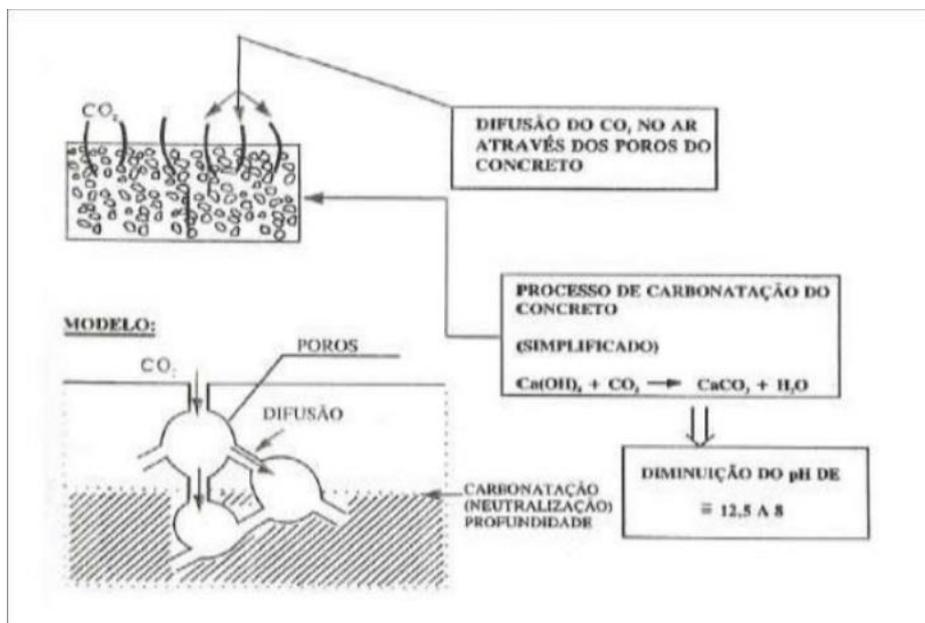
hidróxido de cálcio desaparece no interior dos poros, e origina o carbonato de cálcio, que faz com que o pH do concreto diminua de valores entre 12,5 e 14 para valores inferiores a 9.

Existem alguns fatores que aceleram o processo de carbonatação, segundo Lapa (2008) a velocidade do processo é função da difusão de CO₂ no concreto, umidade relativa, tempo, relação a/c, tipo de cimento, permeabilidade do concreto e cura. O grau de carbonatação máximo ocorre a uma umidade relativa de 60%, enquanto em um ambiente seco ou saturado a carbonatação é reduzida para 20% deste valor.

A velocidade da reação de carbonatação no concreto irá depender de vários fatores relacionados às condições de exposição, como a umidade relativa do ar, temperatura e concentração de CO₂. As características do concreto, como traço e composição química do cimento, também irão influenciar (SANTOS, 2015).

A Figura 11 mostra uma representação gráfica do processo de carbonatação e as reações que ocorrem.

Figura 11 - Processo de Carbonatação do Concreto



Fonte: Santos (2015)

Sendo assim, a Figura 11 mostra como ocorre a difusão do gás carbônico através dos poros do concreto e o avanço da frente de carbonatação.

Segundo Cascudo (1997), uma característica do processo de carbonatação é a existência de uma “frente” de avanço do processo, que separa duas zonas com pH muito diferentes: uma

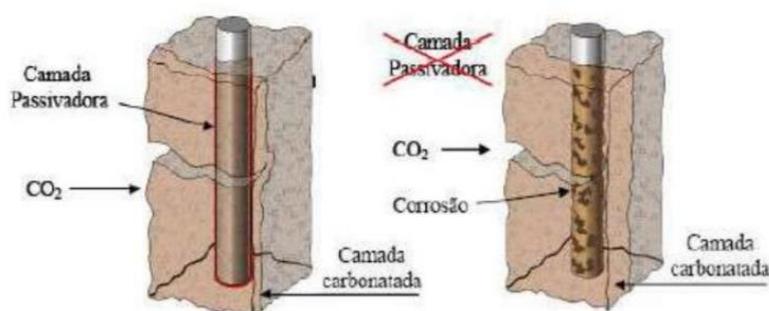
com pH menor que 9 (carbonatada) e outra com pH maior que 12 (não carbonatada). Ela é comumente conhecida como frente de carbonatação, e avança progressivamente para o interior do concreto, devendo sempre ser mensurada com relação à espessura do concreto de cobertura da armadura. É importante que essa frente não atinja a armadura. Caso contrário, isto é, ao atingi-la, gera sua despassivação, que é a perda da camada passivadora protetora do aço.

A umidade ambiental é um fator determinante na velocidade da reação de carbonatação. Quando o concreto não apresenta água nos poros, a difusão de CO_2 ocorre normalmente e não há reação devido à falta de água no meio; já nos poros totalmente saturados, a carbonatação não ocorre pois não há difusão de CO_2 . Portanto, quando os poros estão parcialmente saturados, a difusão do gás carbônico é facilitada e a água do meio torna a condição mais favorável para o aparecimento da frente de carbonatação (BAKER, 1988 apud POSSAN, 2010).

A temperatura também é um fator a ser analisado no processo de carbonatação. Segundo Possan (2010), a temperatura do meio tem pouca influência no início da carbonatação do concreto, mas tem grande importância durante a propagação da manifestação patológica pois está diretamente ligada com a taxa de corrosão da armadura.

A Figura 12, ilustra o avanço da frente de carbonatação.

Figura 12 - Avanço da frente de carbonatação



Fonte: Santos (2015)

Como ilustrado na Figura 12, o avanço da frente de carbonatação, a despassivação da armadura ocorre quando a frente de carbonatação atravessa a camada de cobertura e atinge a armadura. Desta forma, tem-se que a carbonatação do concreto proporciona o início do processo de corrosão da armadura (CASCUDO, 1997).

Em relação a velocidade e profundidade da carbonatação, Figueiredo (2005) entende que a velocidade e a profundidade de carbonatação dependem de fatores relacionados com o

meio ambiente e com as características finais do concreto endurecido, conforme apresentado no Quadro 3:

Quadro 3 - Principais fatores que condicionam a velocidade de penetração da frente de carbonatação

Fatores Condicionantes		Características Influenciadas
Fatores Ambientais ou Condições de Exposição	Concentração de CO ₂	Mecanismo Físico-Químico
		Velocidade de Carbonatação
	Umidade Relativa do ar	Grau de saturação dos poros
		Velocidade de Carbonatação
Características do Concreto	Tipo e Quantidade de cimento	Reserva alcalina
	Relação água/cimento	Porosidade e Permeabilidade
	Condições de cura	Grau de hidratação, porosidade, permeabilidade e fissuração
	Fissuras	Facilita a entrada de CO ₂

Fonte: Kazmierczak (1995 apud Figueiredo, 2005)

Percebe-se, através do Quadro 3, que um concreto poroso e fissurado, e que se encontra em um ambiente úmido e com alta concentração de CO₂, sofrerá uma rápida penetração da frente de carbonatação, diminuindo assim a durabilidade da estrutura.

2.2.4.1 Diagnóstico

Segundo Andrade (1992), a corrosão de armadura geralmente é perceptível através de manchas de óxidos ou hidróxidos na superfície do concreto, além de fissuras que ocorrem paralelas à armadura. Entretanto, a autora destaca que a corrosão pode ocorrer sem que haja sinais visíveis na superfície do concreto.

Para uma inspeção detalhada da deterioração do concreto, Andrade (1992) especifica uma sequência de etapas, iniciando pela amostragem, que tem por finalidade dividir a estrutura em frações que sejam representativas da mesma, já que a análise de toda a estrutura geralmente é inviável. Alguns critérios para realizar a amostragem é dividir a estrutura em partes que contenham a mesma característica do concreto no estado inicial de colocação na obra (como

simultaneidade da concretagem e resistência mecânica), agressividade do meio (distinção de áreas internas e externas) e grau de deterioração do concreto. Posteriormente, deve-se realizar uma inspeção visual do concreto e da armadura, medindo a redução de diâmetro da mesma e a cor e aspecto dos produtos da corrosão. Por fim, pode-se determinar que a carbonatação é a causa da patologia através da fenolftaleína.

Existem diversos métodos laboratoriais para a determinação da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto. Um método simples e comumente utilizado para avaliar a carbonatação em um elemento de concreto armado, resulta da aplicação de fenolftaleína diluída em álcool na superfície exposta do mesmo. O hidróxido de cálcio livre reage tornando-se cor de rosa, enquanto as partes já carbonatadas permanecem incolores (Ferreira, 2000). Além disso, é possível a timolftaleína como outro indicador químico para detecção da frente de carbonatação (PAULETTI, 2004).

A Figura 13, apresenta a solução de fenolftaleína aplicada em um corpo de prova.

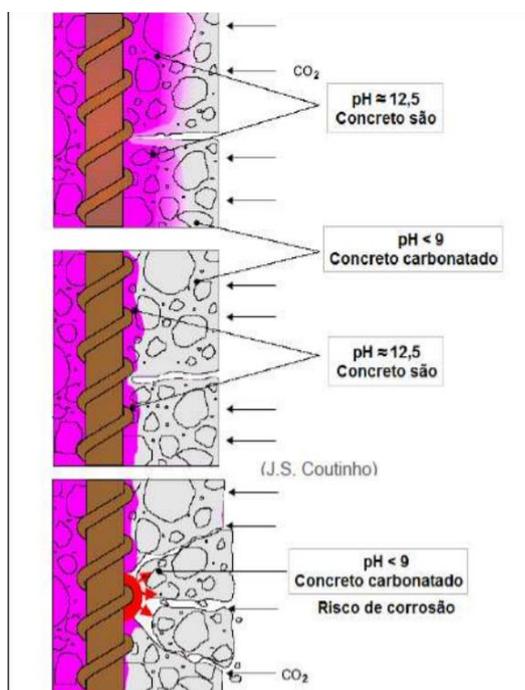
Figura 13 - Solução de fenolftaleína aplicada em corpo de prova de concreto após rompimento por compressão diametral



Fonte: Silva (2020)

A Figura 14, a seguir, ilustra a situação da estrutura a partir da aplicação da solução de fenolftaleína, que indica um pH alto e não aponta a presença da frente de carbonatação.

Figura 14 - Avanço da carbonatação, indicada por teste químico via fenolftaleína



Fonte: Coutinho (2001)

2.2.4.2 Profilaxia

Entre as medidas para evitar a corrosão da armadura por carbonatação está o respeito ao cobrimento mínimo das armaduras e a relação água/aglomerante estabelecidos pela NBR 6118/2014. De acordo com a norma, existem quatro níveis de agressividade do ambiente (conforme a Tabela 1), e para cada nível existe uma relação água/cimento máxima permitida, uma resistência característica à compressão mínima (conforme Tabela 2) e um valor mínimo de cobrimento nominal, que varia também de acordo com o tipo de elemento estrutural (conforme a Tabela 3). Além disso, Andrade (1992) afirma que o uso de adições como pozolana e cinza volante, se bem curado o concreto, confere à estrutura um grau maior de impermeabilidade, o que aumenta o tempo necessário para que a frente de carbonatação atinja a armadura.

Para ambientes muito agressivos podem ser utilizadas outras técnicas que fornecem mais proteção à armadura, sendo, entretanto, mais custosas. De acordo com Andrade (1992), pode-se realizar a proteção catódica através da aplicação de uma corrente na armadura, a galvanização através da submersão do aço em um banho de zinco, o recobrimento da armadura

com resina epóxi ou a utilização de aditivos inibidores de corrosão na água de amassamento do concreto, como dicromato potássico, cloreto estanhoso, cromato de zinco ou chumbo, entre outros.

Visando a prevenção e proteção do concreto em relação a carbonatação. As medidas preventivas para este processo, segundo a ABNT NBR 6118:2014, consistem em dificultar a penetração dos agentes agressivos no interior do concreto, fazendo-se uso de um concreto de baixa porosidade, executando um revestimento adequado das armaduras e o estabelecimento de um maior controle de fissuração.

Um concreto que apresenta poros secos, dificulta que o CO₂ se ionize, devido a falta do meio aquoso, e mesmo que ocorra, o processo de carbonatação será extremamente lento. Num concreto de poros preenchidos por água, o CO₂ não consegue penetrar e difundir-se (Silva, 1995).

2.2.4.3 Terapia

A recuperação das armaduras, danificadas pela corrosão, é delicada segundo Helene (1986) e requer mão de obra especializada. Consiste em três etapas, sendo elas: A etapa 1 é a limpeza rigorosa, de preferência com jato de água e quebra de todo o concreto solto ou fissurado, inclusive das camadas de óxidos/hidróxidos das superfícies das barras. A etapa 2 é analisar rigorosamente se existe uma possível redução de seção transversal das armaduras atacadas. Se for viável, fazer esta análise através de ensaios comparativos entre armaduras saudáveis e as que estiverem mais atingidas. Se for o caso, colocar novos estribos e/ou novas armaduras longitudinais. E a etapa 3 é reconstrução do revestimento das armaduras de preferência com concreto bem adensado, com o intuito de impedir a penetração de umidade, oxigênio e agentes agressivos até a armadura, e recomposição da área da seção de concreto original, além de propiciar um meio que garanta a manutenção da capa passivadora do aço, com processos de proteção catódica, galvanização ou revestimento com resina epóxi.

2.2.5 Ataques por cloretos

A corrosão por cloretos estará mais propensa a ocorrer em estruturas localizadas em ambientes agressivos, como as estruturas próximas ao mar ou áreas industriais. Quando há uma grande quantidade de cloretos presente, o concreto tende a conservar mais umidade,

aumentando o risco de corrosão pela diminuição da resistividade elétrica do concreto (REIS, 2001).

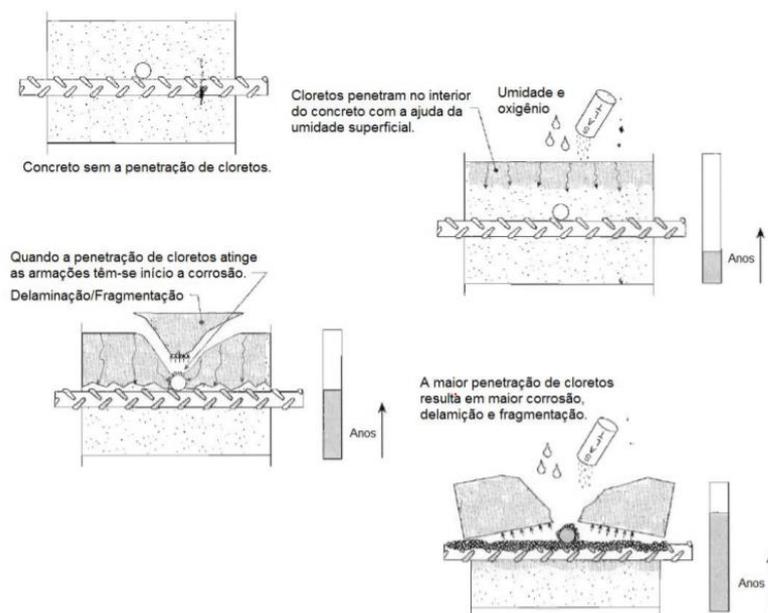
O contato dos íons e concreto pode ser feito a partir do CaCl_2 , contido em aditivos aceleradores de pega, nas impurezas na água de amassamento e nos agregados, na maresia, processos industriais entre outros (CÁNOVAS, 1984).

Os cloretos podem chegar ao concreto de diversas formas. Segundo Figueiredo (2005), sendo elas:

- Uso de aceleradores de pega que contêm CaCl_2 ;
- Na forma de impurezas dos agregados e da água de emassamento;
- Atmosfera marinha;
- Água do mar;
- Sais de degelo;
- Processos industriais.

A Figura 15, a seguir, apresenta o processo de penetração e o efeito dos cloretos no concreto, no decorrer dos anos.

Figura 15 - Processo de penetração dos íons cloreto no interior do concreto armado



Fonte: Emmons - Adaptado (1994)

Como pode ser observado na Figura 16, a umidade superficial permite que os íons cloreto penetrem no concreto e, com o passar do tempo, os íons atingem a armadura e então tem-se início a corrosão. Se não tratada, a estrutura com a armadura corroída pode colapsar pois não apresenta a mesma capacidade portante que uma estrutura sã.

Os parâmetros que influenciam o processo de penetração dos íons cloretos são similares aos que influenciam o processo de carbonatação, citados anteriormente. Sendo eles, a relação água/cimento, o adensamento, a cura e sobretudo o cobrimento da armadura em ambientes com presença de cloretos.

A ABNT NBR 12655:2015 apresenta exigências mínimas para concretos em condições especiais de exposição, na qual inclui a exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar ou respingos, ou borrifação desses agentes. O concreto deve possuir uma relação água/cimento, em massa para concreto com agregado normal de no máximo 0,40 e um valor mínimo de fck igual a 40 MPa, para concreto de agregado normal ou leve. Como ilustra a Tabela 5.

Tabela 5 - Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição

Condições de Exposição	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal	Mínimo valor de fck (para concreto com agregado normal ou leve) MPa
Condições em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água, por exemplo, em caixas d'água	0,5	35
Exposição a processos de congelamento e descongelamento em condições de umidade ou a agentes químicos de degelo	0,45	40
Exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes	0,45	40

Fonte: NBR 12655 - Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento (2015)

A ABNT NBR 12655:2015 estabelece ainda o valor máximo da concentração de íons cloreto no concreto endurecido, considerando a contribuição de todos os elementos presentes no concreto, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Teor máximo de íons cloreto para proteção da armadura

Classe de Agressividade	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl-) no concreto % sobre a massa de cimento
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: NBR 12655 - Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento (2015)

A NBR12655:2015 também destaca que quando forem realizados ensaios para determinação do teor de íons cloreto solúveis em água, deve ser seguido o procedimento da ASTM C 1218:18.

2.2.5.1 Diagnóstico

É possível determinar a presença e o teor de cloretos através de alguns ensaios, mas serão apresentados aqui apenas os ensaios conforme as normas ASTM C1218:17 e ASTM C114:18, segundo Pereira e Cincotto (2001). Inicialmente, é necessário preparar a amostra, que é obtida através da repartição de um corpo-de-prova cilíndrico (10x20cm) em quatro seções de igual altura, e, após, cada seção é dividida em quatro partes. Cada amostra representa, portanto, 1/16 avos do corpo-de-prova, e deve ser moída totalmente até passar em peneira ABNT de 0,84 mm (nº20). Por fim, as amostras devem ser secas em estufa a 100°C.

O ensaio de cloreto solúvel em água (ASTM C1218) consiste em deixar 5 gramas da amostra de concreto em fervura por alguns segundos em um béquer coberto, evitando a perda de cloretos por volatilização. Posteriormente, a solução é filtrada e então é realizada a sua titulação (PEREIRA; CINCOTTO, 2001).

O ensaio de cloreto total solúvel em ácido (ASTM C114) consiste em deixar 5 gramas da amostra de concreto em solução de ácido nítrico 1:1 e, após um aquecimento rápido, a amostra é filtrada e então é realizada a titulação (PEREIRA; CINCOTTO, 2001).

2.2.5.2 *Profilaxia*

Para que se possa evitar a contaminação do concreto por cloretos é limitar o seu teor em relação à massa de cimento ou concreto. Segundo Andrade (1992), o teor máximo de cloretos totais varia entre as normas de diferentes países, mas um valor médio aceito é de 0,4% em relação à massa de cimento ou 0,05-0,1% em relação à massa de concreto.

A ABNT NBR 6118:2014 indica como medidas preventivas a utilização de um concreto de baixa porosidade e com adição de escória ou material pozolânico, dificultando a entrada dos íons para o interior do concreto, além de respeitar as medidas de cobrimento mínimo para cada classe de agressividade do meio e controlar a fissuração.

2.2.5.3 *Terapia*

A terapia indicada para casos manifestações patológicas causadas por ataque de cloretos é a mesma indicada para os casos de carbonatação descrita em 2.2.4.3, sendo constituída por remoção do concreto danificado, limpeza e proteção das armaduras e por último o reparo estrutural com argamassa ou concreto.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas informações apresentadas neste trabalho, pode-se afirmar que é de extrema importância prevenir o aparecimento de manifestações patológicas a fim de que a estrutura de concreto armado apresente desempenho satisfatório ao longo da sua vida útil. A profilaxia envolve cuidados tanto na fase de projeto quanto na fase de execução, cabendo ao(s) profissional(is) responsável(is) projetar e executar a obra em conformidade com as normas apresentadas.

As manifestações patológicas apresentadas impactam na segurança dos usuários da estrutura, além de exigirem investimentos financeiros representativos para que sejam tratadas. Portanto, uma estrutura projetada e executada corretamente, respeitando as medidas profiláticas necessárias, e submetida à manutenção periódica, será mais econômica a longo prazo do que uma estrutura que exigir intervenções para que continue apresentando desempenho satisfatório. Como apresentado, o custo total da estrutura a longo prazo, considerando os gastos com a

recuperação da mesma, pode ser de aproximadamente 94 vezes o valor caso o projeto e a execução fossem realizados adequadamente.

Com este trabalho espera-se contribuir para a comunidade técnica, no que se refere a durabilidade e vida útil das construções em concreto armado, reunindo informações que deveriam ser de conhecimento de todo engenheiro (a) civil.

Por fim sugere-se para trabalho futuros, utilizar os conceitos sobre a deterioração das estruturas de concreto e suas manifestações patológicas, para aplicação na prática dos procedimentos de diagnóstico, profilaxia e terapia, através de estudos de caso.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edifícios habitacionais – desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16280**: Reforma em edificações — Sistema de gestão de reformas — Requisitos. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5674**: Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção. Rio de Janeiro, 2012.

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 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 1996.

AGÊNCIA BRASIL. **PIB da construção civil deve crescer 4% em 2021**. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2020-12/pib-da-construcao-civil-deve-crescer-4-em-2021>. Acesso em: 10 jun 2021.

AGÊNCIA IBGE NOTÍCIAS. **PIB cresce 3,2% no 4º tri, mas fecha 2020 com queda de 4,1%, a maior em 25 anos**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/30166-pib-cresce-3-2-no-4-tri-mas-fecha-2020-com-queda-de-4-1-a-maior-em-25-anos>. Acesso em: 10 jun 2021.

AGUIAR, J. E. de. **Durabilidade, proteção e recuperação das estruturas**. Notas de aula. Especialização em Construção Civil (Especialização / Aperfeiçoamento) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Arquivo em. ppt.

AGUIAR, J. E. **Patologia e Durabilidade das Estruturas de Concreto**. Notas de aula (especialização em construção civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte: 2014. 298 p.

AMBROZEWICZ, P, H, L. **Materiais de construção**: Normas, Especificações, Aplicação e ensaios de laboratório. 1. ed. São Paulo: Pini, 2012.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de Obras Deterioradas por corrosão de Armaduras**. São Paulo: Pini, 1992, 104p.

ANDRADE, T.; SILVA, A. J. C. **Patologia das Estruturas**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

BERBERIAN, D. **Engenharia de Fundações**. 32 ed. Brasília: UNB, 2011.

BOLINA, F. L.; HELENE, P. R. do L.; TUTIKIAN, B. F. **Patologia de Estruturas**. 1ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. Tradução: M. Celeste Marcondes, Carlos Wagner Fernandes dos Santos, Beatriz Cannabrava. São Paulo: PINI, 1988.

CASA DO CONSTRUTOR. **O que é eflorescência e como resolver**. Disponível em: <https://info.casadoconstrutor.com.br/almanaque/dicas/o-que-e-eflorescencia-e-como-resolver/>. Acesso em: 28 maio 2021.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. Goiânia: Editora UFG, 1997.

CBIC DADOS. **Participação do PIB da Construção Civil no PIB Brasil**. Disponível em: <https://www.cbicdados.com.br/menu/sala-de-imprensa/sala-de-imprensa>. Acesso em: 02 julho 2021.

COUTINHO, J. S. **Durabilidade: ataque por sulfatos**. Apostila da disciplina. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto (Portugal), 2001.

DE PAULA, C. **Patologias de estruturas de concreto: identificação e tratamento**. AECweb, c2021. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/patologias-de-estruturas-de-concreto-identificacao-e-tratamento/14342>. Acesso em: 28 maio 2021.

DEPIZZOL, F. **Manifestações Patológicas em edificação: Lixiviação**. Vilha Velha, ES. 2017. Disponível em: <https://guideengenharia.com.br/lixiviacao-em-edificacoes>.

DO CARMO, PAULO OBREGON. **Patologia das construções**. Santa Maria, Programa de atualização profissional – CREA – RS, 2003.

EMMONS, P. H. **Concrete Repair and Maintenance**. Kingston: R. S. Means Company, 1993. 295 p. ISBN 0- 87629- 286- 4

ESCADEILLAS, G.; HORNAIN, H. A durabilidade do concreto frente a ambientes quimicamente agressivos. In: OLLIVIER, J.-P; VICHOT, A. (Eds). **Durabilidade do concreto: bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com meio ambiente**. 1. Ed. São Paulo: Ibracon, 2014. P 433-507.

ESCOLA DE SERVIÇO PÚBLICO DO ESPÍRITO SANTO. **Noções básicas sobre avaliação de risco estrutural**. Disponível em: https://defesacivil.es.gov.br/Media/defesacivil/Capacitacao/Material%20Did%C3%A1tico/CAR/Avalia%C3%A7%C3%A3o%20de%20Risco%20Estrutural_ESESP.pdf. Acesso em: 10 jun 2021,

FERREIRA, R. M. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão**. Guimarães, 2000. Disponível em: < https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/40/1/Rui_Miguel_Ferreira_DECivil.pdf >. Acesso em: 20 dez. 2020.

FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. Cap.27, p.829-855

GOMES, T. L. F. **Recuperação Estrutura de Blocos de Fundação pela Reação Álcali-agregado** – A Experiência do Recife. Recife, 2008. Disponível em: http://tede2.unicap.br:8080/bitstream/tede/35/1/dissertacao_eduardo_alvez.pdf Acesso em: 20/05/2021.

GRANDISKI, P. **Perícias Judiciais**. São Paulo: CREA-SP/IBAPE-SP, 1995. v. 1, p.111.

HARVEY, C.; **Delta air lines flying high with containment coatings**. CoatingsPro Magazine, 2014. Disponível em: <http://www.coatingspromag.com/articles/concret-coatings/2014/11/delta-air-lines-flying-high-with-containment-coatings>. Acesso em: 06 dez. 2020.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcaliagregado e caracterização avançada do gel exsudado**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: PINI, 1986.

HELENE, P. Introdução da Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto. In: WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES, 1997, São Leopoldo. **Anais**. São Leopoldo, 1997. p. 31-42.

HELENE, P.; PEREIRA, F. **Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de concreto**. São Paulo: Paulo Helene & Fernanda Pereira, 2007.p. 18-32.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2021. **Produto Interno Bruto – PIB**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>. Acesso em: 10 jun. 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2019. **Produto Interno Bruto – PIB 2019**.Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso: 10 mar. 2021

ISAIA, G. (Org). **Concreto: ciência e tecnologia**. v.2. São Paulo: Ipsilon, 2011.

KERKOFF, M. **Manifestações Patológicas em edificação: Lixiviação**. Vilha Velha, ES. 2017. Disponível em: <https://guideengenharia.com.br/lixiviacao-em-edificacoes>.

LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. 2008. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. 56 p.

LIMA, M. G. **Ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, Cap. 21, p.733 – 751, V.1, ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo. 2005.

MACHADO, A. P. **Reforço de estrutura de concreto armado com fibras e carbono**. São Paulo: PINI, 2002.

MAGALHÃES, Aldo Giuntini de. **Durabilidade, proteção e recuperação das estruturas**. Notas de aula. Curso de Especialização em Construção Civil (Especialização / Aperfeiçoamento) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Arquivo em .pdf.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MIZUMOTO, C. **Investigação da Reação Álcali-Agregado (RAA) em Testemunhos de Concreto e Agregados Contribuintes**. Dissertação de Mestrado: Programa da Pós-Graduação em Engenharia Civil: Universidade Paulista. Ilha Solteira – SP. 2009

MOREIRA, C. **Realcalinização de estruturas de concreto carbonatado com utilização de gel saturado de solução alcalina**. Goiânia, 2006.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Editora Bookman, 2015.

OLIVARI, G. **Patologia em edificações**. São Paulo: Universidade Anhembi Morumbi, 2003.

OLIVEIRA DE SENA. et al. **Patologia das construções**. Salvador, 2ª educação, 2020. v.1, p.256.

OLIVEIRA, F. G. X. et al. **Custos de recuperação estrutural: um estudo de caso**. In: Congresso Latino-americano de Patologia das Construções, 9, 2007. Quito, Equador, 2007. Disponível em: https://d1wqtzts1xzle7.cloudfront.net/38741664/Artigo_Compat.pdf?1442025259=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCUSTOS_DE_RECUPERACAO ESTRUTURAL_U M_ESTU.pdf&Expires=1624826698&Signature=VAcht5Bm7HkPiBhovD1jRqfHJw5EuY0fI AVZyIZDtTeOw6kLWAYdZYed6P~4knhOAFbkrAitxxZqkQRYBx45QGD6DWrzbcKpZx KjML9NjPK17InWUS0kvFuifrDwowHpzcGlfUzNSyn55dqB6Dnm9ULeILcSCvKbKQqsEz B~jayy1lFo9k2sUhibLrJoiJnomjv1o1BCXE~AeqSmCa7LsxBgFNH4R~GN5i7efH0vLolRw qqKoZ75~QiLGidJpwlZiJD1zGdSOZRqeEGeTJKKyycsltm9xe0xDtxl9QK0jBBn1Bg1RyO7 Ys2BAZcyLe6oZY7W-FPb7pzI3JqqXAA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 26 jun 2021.

- PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/5157/000466019.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10 jun. 2021.
- PEREIRA, L. C.; CINCOTTO, M. A. **Determinação de cloretos em concreto de cimentos Portland: influência do tipo de cimento**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2001.
- PIANCASTELLI, E.M. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto Armado**. Apostila para Curso de Extensão, Ed. Depto. Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1997
- POGGIALI, F. S. J. **Durabilidade de estruturas de concreto em usinas siderúrgicas**. 2009. 81f. Monografia (Aperfeiçoamento / Especialização), Especialização em Construção Civil – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/28923>. Acesso em: 10 jun. 2021.
- POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. **Desempenho, Durabilidade e Vida útil das edificações: Abordagem Geral**. Disponível em: <http://creaprw16.creap.r.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/article/view/14>. Acesso em 04 de maio de 2021.
- REIS, L. S. N. **Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado**. 2001. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2020.
- RIBEIRO, D. V. et al. **Estudo das reações álcalis-sílica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento**. São Carlos, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/ce/v58n345/15.pdf>. Acesso em: 28 maio 2021.
- SANTOS, M. R. G. **Deterioração das estruturas de concreto armado – estudo de caso**. 2012. 122f. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2012. Disponível em: <http://pos.demc.ufmg.br/novocecc/trabalhos/pg2/88.pdf>. Acesso: 25 maio 2021.
- SANTOS, A. V. Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido a carbonatação. **Especialize Online IPOG**, Goiânia, v. 1, n. 10, dez. 2015. Disponível em: Acesso em: 20 dez. 2020.
- SILVA, G. A., **Recuperação de Blocos de Coroamento Afetados pela Reação Álcali Agregado**, Tese de Mestrado, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil, 2007.
- SILVA, P. F. **A Durabilidade da Estruturas de Concreto Aparente em Atmosfera Urbana**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1995.

SILVA, Turíbio José da. **Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro**. 1998. 290f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola técnica superior d’enginyers de Camins, Universidade Politècnica da Catalunya, Barcelona, 1998.

SILVA, H. C.; MELO, F. P. **Carbonatação do concreto**: análise comparativa da profundidade de carbonatação em concretos com agregados convencionais e reciclados. 2020. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/1316>. Acesso em: 28 maio 2021.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço das Estruturas de Concreto**. 4. ed. São Paulo: PINI, 1998.

THOMAZ, E. C. S. **Ataque de Sulfatos ao Concreto de Cimento Portland**. Notas de Aula – Instituto Militar de Engenharia. 2016. Disponível em: http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/pad_cimentos.htm. Acesso em: 14 dez. 2020.

TUTIKIAN, B. F.; PACHECO, M. **Boletim Técnico 01**: inspeção, diagnóstico e prognóstico na construção civil. Alconpat Internacional: Mérida, 2013.

VIEIRA, S. **Patologias de estruturas de concreto**: identificação e tratamento. São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/os-problemas-causados-pela-lixiviacao-do-concreto/>. Acesso: 25 maio 2021.

ZAMBOTTO, D. **Estudo preliminar dos efeitos da reação álcali-agregado nas respostas estruturais de pavimentos de concreto**. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-05012016-154709/pt-br.php>. Acesso em: 10 jun. 2021.