



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CAIO RODRIGO BAREL CAVALCANTE

MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO:
CAUSAS, SOLUÇÕES E APLICAÇÕES

FORTALEZA

2025

CAIO RODRIGO BAREL CAVALCANTE

MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO:
CAUSAS, SOLUÇÕES E APLICAÇÕES

Projeto de graduação apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Augusto Teixeira de Albuquerque.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo autor

C1m

Cavalcante, Caio Rodrigo Barel.

Manifestações patológicas em estruturas de concreto : causas, soluções e aplicações / Caio Rodrigo Barel Cavalcante. – 2025.
90 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque.

1. Engenharia civil. 2. Manifestações patológicas. 3. Recuperação de estruturas de concreto.
4. Ponte dos Ingleses. I. Título.

CDD 620

CAIO RODRIGO BAREL CAVALCANTE

MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO:
CAUSAS, SOLUÇÕES E APLICAÇÕES

Projeto de graduação apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 29/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Joaquim Eduardo Mota
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus, supremo benfeitor, por toda misericórdia e graça alcançada.

A minha família que tornaram possível a minha formação, pelo sustento e apoio diário.

A Ana Maria, companheira nos bons e maus ventos, pela amizade e amor singular.

RESUMO

As manifestações patológicas representam parcela significativa do orçamento público e, frequentemente, causam comoção social devido às tragédias que provocam com o seu agravamento. Essas manifestações resultam da degradação progressiva das estruturas de concreto, acentuada por agentes externos e internos, elas foram objeto deste estudo, o qual elaborou uma revisão bibliográfica em referências normativas (nacionais e estrangeiras) e produções técnicas a respeito do assunto. Foram abordadas as principais manifestações patológicas em estruturas de concreto, incluindo corrosão de armaduras, ataque por íons cloreto, carbonatação, reação álcali-agregado e ataque por sulfatos. Discutiram-se também os mecanismos de transporte que facilitam a entrada de agentes agressivos, como permeabilidade, difusão e absorção capilar, além das reações envolvidas e das estratégias de prevenção e correção. Além da perspectiva técnica, foram abordados aspectos econômicos, como o aumento do custo de correção ao longo do tempo (lei de Sitter) e ambientais. Por fim, como forma de aplicar os conceitos em um caso concreto, foi realizado um estudo de caso sobre a recuperação e reforço estrutural da Ponte dos Ingleses, construção com grande importância histórica e turística, localizada em Fortaleza, Ceará, o estudo traz uma abordagem histórica de concepção e manutenções da estrutura, os ensaios laboratoriais e in loco realizados, as recomendações feitas pelo projetista e finaliza com a execução dos serviços, onde foram demonstradas as etapas e justificativas quanto aos procedimentos e métodos empregados.

Palavras-chave: manifestações patológicas; degradação de estruturas; Ponte dos Ingleses; recuperação e reforço estrutural.

ABSTRACT

Pathological manifestations account for a significant portion of public budgets and frequently cause social upheaval due to the tragedies resulting from their deterioration. These manifestations arise from the progressive degradation of concrete structures, exacerbated by external and internal agents. They constituted the focus of this study, which conducted a bibliographic review of normative references (both national and international) and technical literature on the subject. The main pathological manifestations in concrete structures were addressed, including reinforcement corrosion, chloride attack, carbonation, alkali-aggregate reaction, and sulfate attack. Transport mechanisms that facilitate the ingress of aggressive agents—such as permeability, diffusion, and capillary absorption — were also discussed, along with the involved reactions and prevention and mitigation strategies. Beyond the technical perspective, economic aspects, such as the increasing cost of remediation over time (Sitter's Law), and environmental considerations were addressed. Finally, to apply the concepts to a concrete case, a case study was conducted on the structural rehabilitation and strengthening of Ponte dos Ingleses (Englishmen's Bridge), a structure of significant historical and touristic importance located in Fortaleza, Ceará. The study presents a historical approach to the structure's conception and maintenance, the laboratory and in-situ tests performed, the recommendations made by the design engineer, and concludes with the execution of services, demonstrating the stages and justifications for the procedures and methods employed.

Keywords: pathological manifestations; structural degradation; Ponte dos Ingleses; rehabilitation and structural strengthening.

RESUMÉ

Les manifestations pathologiques représentent une part importante des dépenses publiques et provoquent fréquemment une commotion sociale en raison des tragédies engendrées par leur aggravation. Ces manifestations résultent de la dégradation progressive des structures en béton, accentuée par des agents internes et externes. Cette étude s'est penchée sur ce phénomène à travers une revue bibliographique fondée sur des normes techniques, tant nationales qu'internationales, et sur des publications spécialisées. Les principales manifestations pathologiques dans les structures en béton ont été abordées, notamment la corrosion des armatures, l'attaque par les chlorures, la carbonatation, la réaction alcali-granulat et l'attaque par les sulfates. Les mécanismes de transport facilitant la pénétration des agents agressifs—tels que la perméabilité, la diffusion et l'absorption capillaire—ont également été traités, de même que les réactions chimiques impliquées et les stratégies de prévention et de réparation. Outre l'approche technique, l'étude a pris en compte des aspects économiques, comme l'augmentation des coûts de réparation dans le temps (loi de Sitter), ainsi que les impacts environnementaux. Enfin, un cas d'application concrète a été étudié à travers l'intervention de réhabilitation et de renforcement structurel de la Ponte dos Ingleses, une construction maritime d'importance historique et touristique située à Fortaleza, Ceará. L'étude présente l'historique de la structure et des interventions antérieures, les essais de laboratoire et sur site réalisés, les recommandations du concepteur, ainsi que l'exécution des travaux, en mettant en évidence les techniques adoptées et leur justification.

Mots-clés: Manifestations pathologiques; dégradation des structures; Ponte dos Ingleses; réhabilitation et renforcement structurel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Desabamento parcial do Viaduto do Eixão Sul, em Brasília/DF.	9
Figura 02: Desabamento do edifício Andrea, em Fortaleza/CE.	9
Figura 03: Desmoronamento parcial de um prédio, em Recife/PE.	10
Figura 04: Queda da Ponte JK, na fronteira entre os estados de Tocantins e Maranhão.	10
Figura 05: Aumento dos custos das intervenções corretivas com o tempo, ou “Lei dos Cinco”.....	12
Figura 06: Distribuição do tamanho dos poros na pasta de cimento.	15
Figura 07: Representação esquemática da relação entre porosidade e permeabilidade.	16
Figura 08: Relação entre a permeabilidade e a relação água/cimento para pastas de cimentos maduros.	17
Figura 09: Representação esquemática da zona de transição em concretos.....	18
Figura 10: Micrografia de um concreto por meio do MEV.....	19
Figura 11: Grau de risco das principais manifestações patológicas com base no meio ambiente.....	23
Figura 12: Corrosão em uma viga de concreto armado.....	28
Figura 13: Modelo de corrosão da armadura.....	30
Figura 14: Classificação das zonas de agressividade do município de Fortaleza/CE, segundo CABRAL e CAMPOS.	34
Figura 15: Diagrama de Pourbaix para o sistema Fe-H ₂ O, a 25°C, demonstrando as regiões de corrosão, de passivação e de imunidade.	40
Figura 16: Esquema visual do processo de carbonatação no concreto.....	41
Figura 17: Frente de carbonatação e alteração do pH ao longo do tempo.....	42
Figura 18: Fatores condicionantes do RAA deletéria.....	46
Figura 19: Fatores condicionantes do RAA deletéria.....	48
Figura 20: Impacto do teor de álcalis na expansão de corpos de prova prismáticos de concreto ao longo do tempo.....	49
Figura 21: Inserção da primeira estaca da Ponte dos Ingleses.	59

Figura 22: Torre do bate-estaca (tipo Cantitravel) fincando as estacas de fundação da ponte.	59
Figuras 23 a 25: Manifestações patológicas encontradas durante a inspeção técnica.	60
Figura 26: Testemunhos após o ensaio de carbonatação.	62
Figura 27: Perfuração com furadeira para análise do pó do concreto.	62
Figuras 28 e 29: Prova de carga estática de estaca.	63
Figura 30: Detalhes do encamisamento e do reforço dos pilares e vigas travessas.	65
Figuras 31 e 32: Montagem da acessibilidade.	66
Figuras 33 e 34: Demolição do concreto deteriorado e apicoamento da superfície.	67
Figura 35: Hidrojateamento para limpeza da superfície.	69
Figura 36: Recomposição de armadura.	69
Figura 37: Pintura protetora com inibidor de corrosão.	70
Figura 38: Instalação dos ânodos de sacrifício (destacados em laranja).	70
Figura 39: Aplicação de concreto projeto via seca.	72
Figura 40: Aplicação de concreto autoadensável.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Correspondência entre classe de agressividade ambiental e relação a/c.	17
Tabela 02: Classes de agressividade ambiental (CAA) conforme a NBR 6118:2023.	22
Tabela 03: Valores de referência de cada indicador de durabilidade diante de uma corrosão induzida por carbonatação (espessura de cobrimento = 30 mm).....	25
Tabela 04: Valores de referência de cada indicador de durabilidade diante de uma corrosão induzida por cloretos (espessura de cobrimento = 50 mm).	25
Tabela 05: Valor crítico de íons cloreto em diferentes normas estrangeiras.	32
Tabela 06: Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $c = 10$ mm.	36
Tabela 07: Classificação da estrutura.	51
Tabela 08: Grau de intensidade da medida preventiva.	52
Tabela 09: Medidas de mitigação da expansão devida a RAS.	52
Tabela 10: Volume molecular dos produtos gerados durante o ataque por sulfatos.	55

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	7
CAPÍTULO 2 – PERMEABILIDADE E OUTROS MECANISMOS DE TRANSPORTE EM CONCRETO.....	14
2.1 Conceitos fundamentais.....	14
2.2 Diferença entre Permeabilidade e Porosidade	15
2.3 Impacto da relação água-cimento (a/c).....	16
2.4 Influência da Zona de Transição	18
2.5 Difusão e Aplicação das Leis de Fick	19
2.6 Absorção capilar	20
2.7 Agressividade do Ambiente.....	21
2.8 Indicadores de durabilidade.....	24
CAPÍTULO 3 – CORROSÃO EM CONCRETO ARMADO	27
3.1 Definições e Conceitos fundamentais.....	27
3.2 Mecanismo da reação	29
3.3 Principais tipos de corrosão	30
CAPÍTULO 4 – CORROSÃO INDUZIDA POR CLORETOS.....	31
4.1 Conceitos fundamentais e mecanismo da reação	31
4.2 Fontes de íons cloreto nas estruturas de concreto.....	33
4.3 Impacto do meio ambiente sobre a velocidade de corrosão	34
4.4 Medidas de correção	35
4.5 Medidas de prevenção	36
CAPÍTULO 5 – CARBONATAÇÃO E SEUS EFEITOS NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	39
5.1 Definições e Conceitos	39
5.2 Mecanismo da reação	40
5.3 Ensaio para verificação da frente de carbonatação.....	42

5.4	Medidas de prevenção e outros impactos da carbonatação	43
CAPÍTULO 6 – REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA)		45
6.1	Histórico e Definições	45
6.2	Tipos de RAA e fatores contribuintes	46
6.3	Medidas de prevenção	49
CAPÍTULO 7 – ATAQUE DO CONCRETO POR SULFATOS.....		53
7.1	Definição e Tipos de ataque	53
Tabela 10: Volume molecular dos produtos gerados durante o ataque por sulfatos.		55
7.2	Agentes contribuintes de íons sulfatos	55
7.3	Medidas de prevenção e correção.....	56
CAPÍTULO 8 – ESTUDO DE CASO: REPARO E REFORÇO ESTRUTURAL DA PONTE DOS INGLESES		58
8.1	História e Concepção da obra.....	58
8.2	Identificação das manifestações patológicas e Ensaios realizados.....	60
8.3	Projeto de recuperação e reforço estrutural	63
8.4	Execução da recuperação e do reforço estrutural	66
CAPÍTULO 9 – CONSIDERAÇÕES FINAIS		73
REFERÊNCIAS		75
ANEXO A – SITUAÇÃO DE CONSERVAÇÃO DAS OBRAS DE ARTE ESPECIAIS FEDERAIS NO ESTADO DO CEARÁ		83
ANEXO B – PROJETOS DE RECUPERAÇÃO E REFORÇO ESTRUTURAL DA PONTE DOS INGLESES		84

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

“Óbvio que o objetivo principal das construções de hoje deve mudar da resistência para a durabilidade” (MEHTA, 1994).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), órgão vinculado ao Ministério dos Transportes, investiu, somente no ano de 2024, cerca de R\$ 2,665 bilhões (Portal da Transparência do Governo Federal) em contratos cujo o objeto dizia respeito à serviços de recuperação, reforço e/ou reabilitação de estruturas de concreto espalhadas por todo o território nacional, ainda assim, apesar de se tratar de uma quantia extremamente considerável, refere-se ao gasto de somente um órgão da Administração Pública de uma esfera específica da Federação, segundo o próprio DNIT, existem 88 obras de arte especiais (OAEs) em estado ruim e 18 em estado crítico, isto é, na iminência de desabar, somente no estado do Ceará (conforme pode ser visto no Anexo 01).

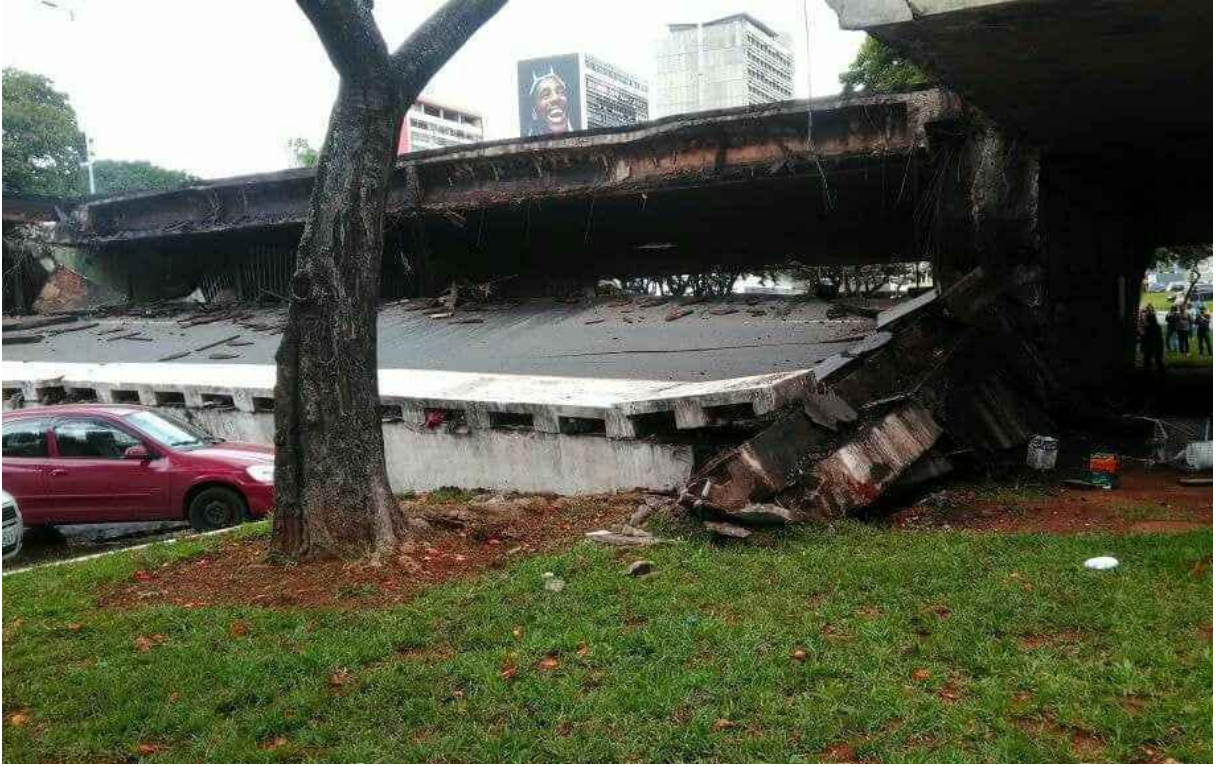
No Brasil, devido ao acelerado crescimento econômico e de infraestrutura que ocorreu na segunda metade do século XX, especialmente durante o período do “milagre econômico” nas décadas de 1960 e 1970, grandes obras como pontes, viadutos e barragens foram construídas em ritmo intenso. Contudo, a falta de manutenção regular e de materiais adequados à realidade climática brasileira, marcada por regiões de alta salinidade e umidade, resultou na deterioração precoce de muitas dessas estruturas (RIPPER e SOUZA, 1998).

A Patologia das estruturas, enquanto campo técnico-científico focado no estudo das manifestações patológicas em edificações, começou a se consolidar no Brasil entre as décadas de 1970 e 1980, impulsionada por pesquisadores pioneiros, destacando-se o professor Manoel Cánovas, autor do livro “Patologia e terapia do concreto armado”, o qual serviu de referência para os estudos e obras que se processavam. A fundação do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), em 1972, teve papel importante na disseminação do conhecimento técnico, na promoção de eventos científicos e na publicação de materiais especializados, como manuais, revistas técnicas e diretrizes para inspeção e reparo de estruturas. Um marco importante para esse campo de estudo foi o surgimento do Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas (Cinpar), sendo o município de Sobral/CE a sede da sua primeira edição, em 2003, fato que sagrou a comunidade acadêmica cearense como um notório polo especializado na temática.

Paralelamente, o concreto armado, ao longo dos anos, passou por profundas evoluções as quais elevaram a qualidade e durabilidade do material. Até década de 1970, as armaduras usadas eram lisas, a partir de estudos e experiências empíricas, percebeu-se que as barras corrugadas apresentavam maior aderência ao concreto, garantindo uma peça mais monolítica. Saltando para a década de 1990, na busca por otimização e qualidade dos recursos e processos, o concreto também passou a ser tratado como um produto industrializado, isto é, surgiram as primeiras usinas de concreto (ou “concreteiras”), indústrias para a confecção de concreto em larga escala com elevado controle de qualidade, essas usinas regulam a relação água/cimento com precisão, usam agregados já previamente caracterizados e inserem aglomerantes com especificação e teores adequados. A mudança de tratamento do concreto como um produto manufaturado para um produto industrializado propiciou um material de melhor qualidade e durabilidade.

A despeito da crescente relevância dessa temática no campo da Engenharia Civil, diversas tragédias ainda marcaram a sociedade brasileira, é possível citar o desabamento do Viaduto do Eixão Sul, em 2018, em Brasília/DF, onde diversos carros foram soterrados, mas o Corpo de Bombeiros conseguiu retirar todas as vítimas com vida (Jornal EL PAÍS), a Figura 01 apresenta um registro fotográfico do sinistro; o desabamento do Edifício Andrea, em 2019, em Fortaleza/CE, o prédio possuía 8 andares, os quais foram inteiramente ao chão causando a morte de nove moradores (Jornal O GLOBO), a Figura 02 demonstra o local logo após o desabamento e as equipes do Corpo de Bombeiros resgatando as vítimas; o desmoronamento parcial de um prédio do Conjunto Beira-Mar, em 2023, em Recife/PE, 24 apartamentos foram atingidos e vitimou 14 pessoas (Jornal O GLOBO), a Figura 03 trata-se de uma vista aérea do local do sinistro com as equipes de resgate fazendo busca por vítimas; e a queda da Ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira, em 2024, que ligava o município de Estreito/MA ao município de Aguiarnópolis/TO, o vão central de 140 metros caiu sobre o rio Tocantins gerando 14 mortes (Jornal O GLOBO).

Figura 01: Desabamento parcial do Viaduto do Eixão Sul, em Brasília/DF.



Fonte: Jornal Correio Braziliense, publicado em 06 de fevereiro de 2018.

Figura 02: Desabamento do edifício Andrea, em Fortaleza/CE.



Fonte: Jornal O Globo, publicado em 15 de novembro de 2019.

Figura 03: Desmoronamento parcial de um prédio, em Recife/PE.



Fonte: Jornal O Globo, publicado em 08 de setembro de 2023.

Figura 04: Queda da Ponte JK, na fronteira entre os estados de Tocantis e Maranhão.



Fonte: Jornal Poder 360, publicado em 22 de dezembro de 2024.

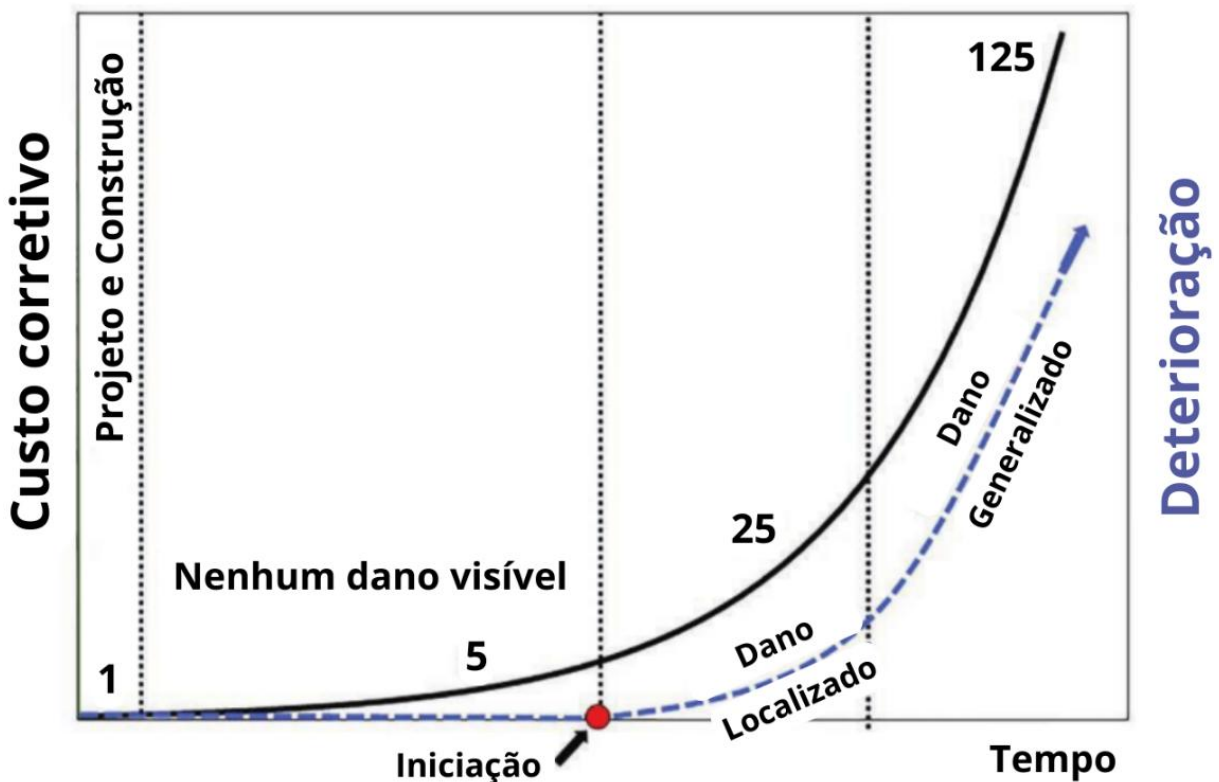
Portanto, embora os investimentos evidenciem a crescente conscientização das autoridades e da sociedade civil sobre o problema, as fatalidades recentes e a frequência de utilização de termos como desempenho, durabilidade, ambiente, conformidade, vida útil e manutenção, indica existir hoje a percepção de que as estruturas e o material concreto estão entrando na “terceira idade” e exigindo um tratamento diferenciado (RIPPER e SOUZA, 1998).

Antes de adentrar nas causas e soluções propriamente ditas, é fundamental entender os principais conceitos e definições que orbitam a temática, a seguir, foram trazidas algumas definições basilares para o campo de estudo.

- Patologia das estruturas: Ciência que procura, de forma sistêmica, estudar os defeitos incidentes nos materiais construtivos, componentes e elementos ou na edificação como um todo, buscando diagnosticar as origens e compreender os mecanismos de deflagração e de evolução do processo patológico, além das suas formas de manifestação (HELENE, TUTIKIAN e BOLINA, 2019).
- Durabilidade: Capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas no manual de uso, operação e manutenção (ABNT NBR 15575-1:2024).
- Vida útil: Período em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos, com atendimento dos níveis de desempenho previstos, considerando a periodicidade e a correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo manual de uso, operação e manutenção (ABNT NBR 15575-1:2024).
- Manutenção: Conjunto de atividades a serem realizadas para conservar ou recuperar a capacidade funcional da edificação e seus sistemas constituintes, a fim de atender às necessidades e segurança dos seus usuários (ABNT NBR 15575-1:2024).
- Manifestação patológica: Ocorrência resultante de um mecanismo de degradação. Sinais ou sintomas decorrentes da existência de mecanismos ou processos de degradação de materiais, componentes ou sistemas, os quais contribuem ou atuam no sentido de reduzir seu desempenho (ABNT NBR 16747:2020).
- Diagnóstico: É a explicitação e o esclarecimento das origens, mecanismo e agentes causadores do fenômeno ou da manifestação patológica (HELENE, TUTIKIAN e BOLINA, 2019).

Conhecendo os principais termos da área e o seu contexto histórico, faz-se interessante a abordagem de um princípio muito difundido nesse ramo de estudo, a “Lei dos Cinco” (SITTER, 1984), SITTER afirma que a probabilidade de um problema se tornar crítico aumenta de forma quíntupla se não for corrigido dentro de um ano, e em 25 vezes se não for corrigido dentro de cinco anos, trazendo para o aspecto do reparo estrutural, a pronta correção dos problemas em estruturas de concreto também é fundamental economicamente, visto que os custos de reparo e manutenção aumentam significativamente à medida que o problema se agrava (HELENE, 2001). Além disso, a falha de uma estrutura pode levar a custos adicionais, como: custos de reparo ou substituição da estrutura; custos de interrupção das atividades e/ou custos de responsabilidade civil. A Figura 05 traz uma representação esquemática da “Lei dos Cinco” aplicada à área da recuperação e manutenção estrutural.

Figura 05: Aumento dos custos das intervenções corretivas com o tempo, ou “Lei dos Cinco”.



Fonte: Adaptado de SITTER (1984).

À medida que foram dispostos os princípios fundamentais da durabilidade das estruturas de concreto, torna-se necessário que o controle de cada etapa influencia diretamente na durabilidade do concreto. É nesse contexto que os mecanismos de transporte em concreto, em especial a permeabilidade, assumem papel de destaque: sendo as vias de acesso de agentes deletérios (água, gases, íons agressivos e afins) ao interior do concreto. Assim, antes de aprofundar-se nos demais mecanismos de deterioração, faz-se necessário compreender como a microestrutura do concreto impacta de forma positiva ou negativa na vida útil da estrutura, temática que será explorada no Capítulo 2.

CAPÍTULO 2 – PERMEABILIDADE E OUTROS MECANISMOS DE TRANSPORTE EM CONCRETO

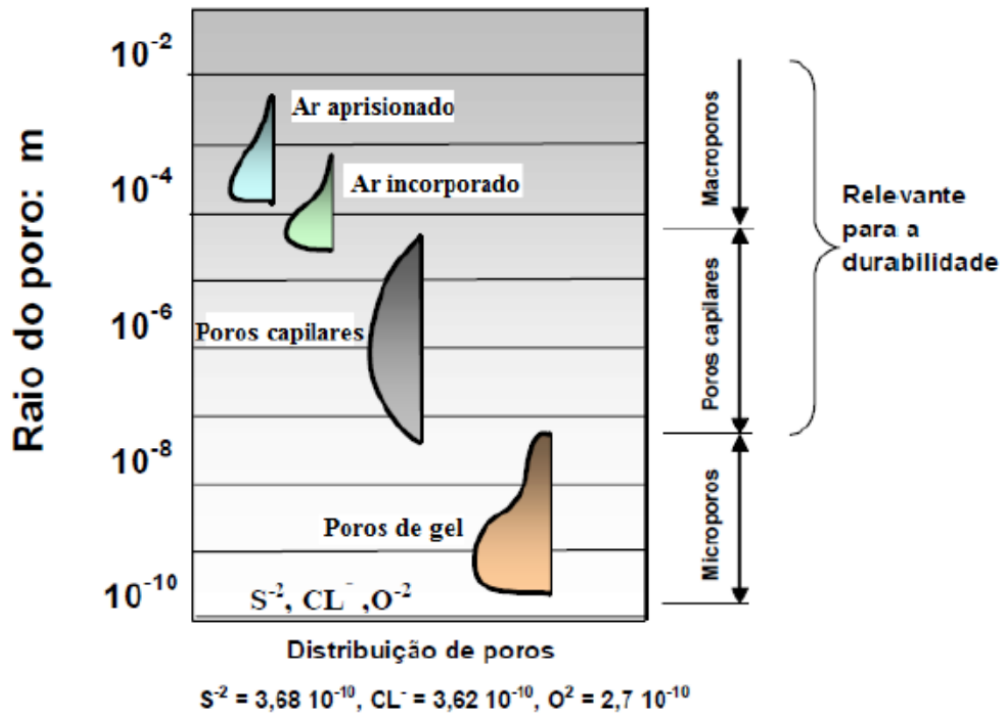
“A permeabilidade é um fator crítico que afeta a durabilidade do concreto, pois permite a entrada íons de agressivos no concreto.” (BASHEER et al., 2001).

2.1 Conceitos fundamentais

A permeabilidade é a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido através de um sólido poroso (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Além disso, a permeabilidade também é influenciada pela distribuição dos poros, pela conectividade entre eles e pela presença de fissuras e defeitos na estrutura do concreto (KANTRO, 1981), assim, é fundamental o entendimento do concreto como um material “pseudo-sólido”, ao invés de simplesmente sólido (RIPPER e SOUZA, 1998).

A permeabilidade do concreto é influenciada pelas dimensões dos poros presentes, muitos deles oriundos da saída da água evaporável (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Os poros podem variar de tamanho, desde os poros capilares, que têm diâmetros da ordem de micrômetros, até os poros de maior tamanho, que podem ter diâmetros da ordem de milímetros (KANTRO, 1981). A distribuição dos poros em termos de tamanho e volume está diretamente relacionado a resistência à penetração do concreto, por diversos mecanismos de transporte. Além disso, a forma e a orientação dos poros também podem influenciar a permeabilidade do concreto (WINSLOW e DIAMOND, 1970). A Figura 06 demonstra a distribuição do tamanho dos poros em meio à pasta de cimento.

Figura 06: Distribuição do tamanho dos poros na pasta de cimento.



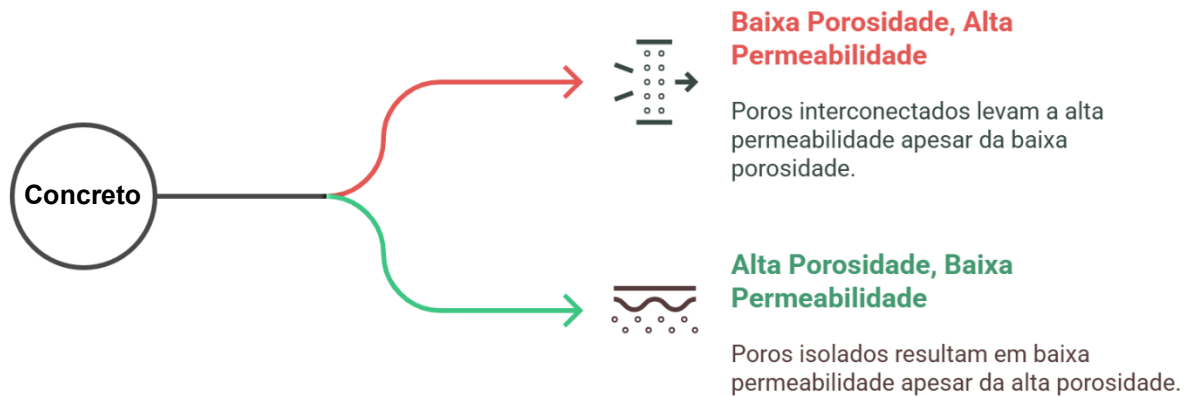
Fonte: Adaptado de SIEBEERT apud FREIRE (2005).

2.2 Diferença entre Permeabilidade e Porosidade

A permeabilidade e a porosidade são propriedades que, embora estejam correlacionadas, são muitas vezes confundidas, segundo NEVILLE (2011), a porosidade diz respeito a todo o espaço no interior do concreto que pode ser ocupado por ar ou por água, independentemente da interconexão entre os poros, enquanto a permeabilidade, conforme comentado, está vinculada ao fluxo do fluido no interior do material, fluxo esse que somente é possível com poros interligados. Segundo RIBEIRO (2021), a interconectividade entre os poros é o principal contribuinte para a permeabilidade, a qual tende a decrescer graças ao refinamento dos poros causado pela evolução da hidratação.

Em suma, um meio poroso pode apresentar baixa permeabilidade, caso os seus poros estejam isolados, enquanto um meio menos poroso pode apresentar alta permeabilidade, caso os tais poros estejam interligados (KOSMATKA e PANARESE, 2002). A Figura 07 representa essa diferenciação de forma esquemática.

Figura 07: Representação esquemática da relação entre porosidade e permeabilidade.



Fonte: De autoria própria (gerada por IA – Napkin AI).

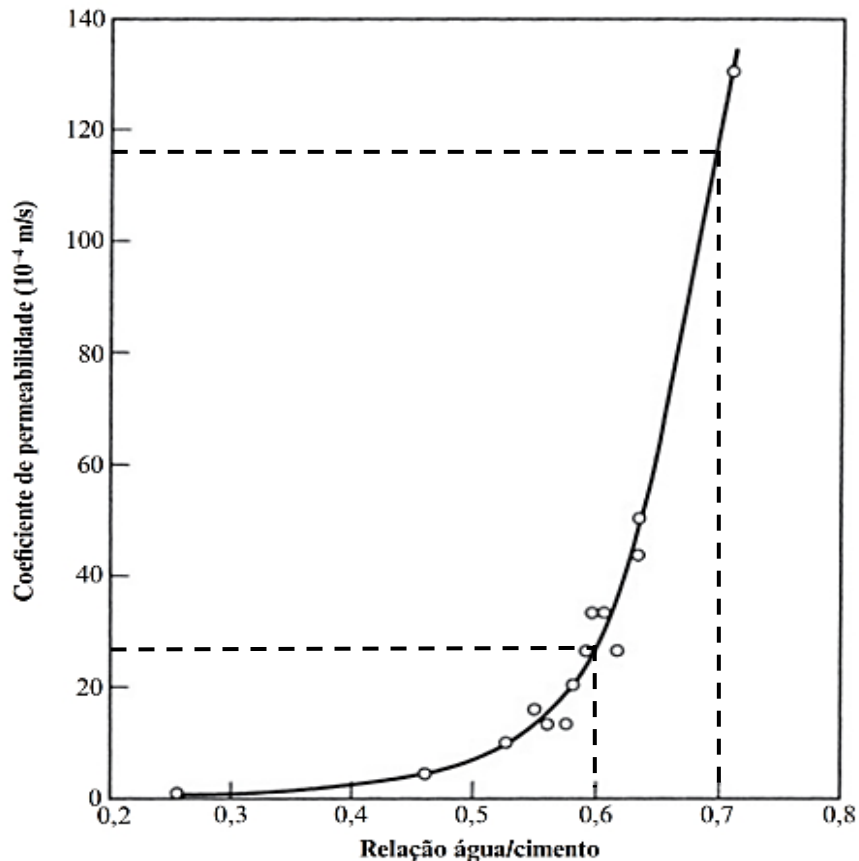
2.3 Impacto da relação água-cimento (a/c)

Apesar de comumente relacionada à resistência (Lei de Abrams), a relação água/cimento é um fator fundamental que também pode afetar a permeabilidade do concreto, MEHTA e MONTEIRO (2014) apontam que uma relação água/cimento alta somada a uma baixa hidratação sinalizarão uma forte probabilidade de alta porosidade capilar. POWERS et al. (1958) moldaram diversos corpos de prova usando variadas relações a/c .

A relação água/cimento pode impactar a permeabilidade do concreto de duas formas: primeiro, evaporação da água livre, isto é, a água em excesso no concreto, que não participou do processo de hidratação, evapora deixando um vazio, segundo, crescimento exacerbado do silicato de cálcio hidratado (CSH) devido à água excessiva, esse fenômeno leva a um aumento da porosidade ao redor dessa partícula gerando vazios de forma generalizada.

A Figura 08 representa graficamente a relação entre a permeabilidade (medida em função da velocidade de penetração no corpo de prova) e o fator água/cimento em diferentes pastas de cimento.

Figura 08: Relação entre a permeabilidade e a relação água/cimento para pastas de cimentos maduros.



Fonte: POWERS et al. (1954).

Através do gráfico, nota-se uma elevação tendendo à exponencial do coeficiente de permeabilidade com o aumento da relação a/c, subindo cerca de 360% ao comparar os valores obtidos com uma relação a/c de 0,6 e 0,7. A NBR 6118:2023, justamente devido a essa forte correspondência entre a relação a/c e a durabilidade, via permeabilidade, define um percentual máximo da relação água/cimento a depender da classe de agressividade ambiental (apresentado na Seção 2.7) a qual o concreto estará submetido, a Tabela 01 demonstra os limites preconizados pela norma.

Tabela 01: Correspondência entre classe de agressividade ambiental e relação a/c.

Concreto	Tipo	Classe de Agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$

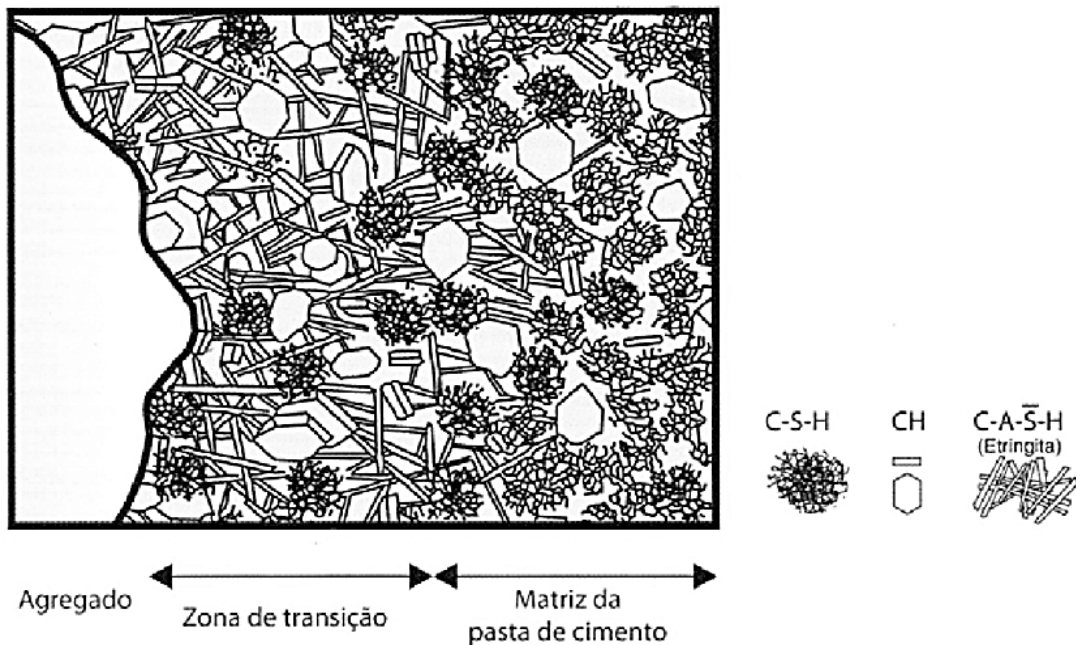
Fonte: ABNT NBR 6118:2023

2.4 Influência da Zona de Transição

No concreto ainda fresco, filmes de água se formam ao redor das partículas do agregado gráudo, gerando um acúmulo de água que contribui para uma maior relação água/cimento nessas regiões, essa elevação da relação a/c impacta no volume dos produtos cristalinos, os quais ficam maiores e elevam a porosidade, assim formando a zona de transição (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

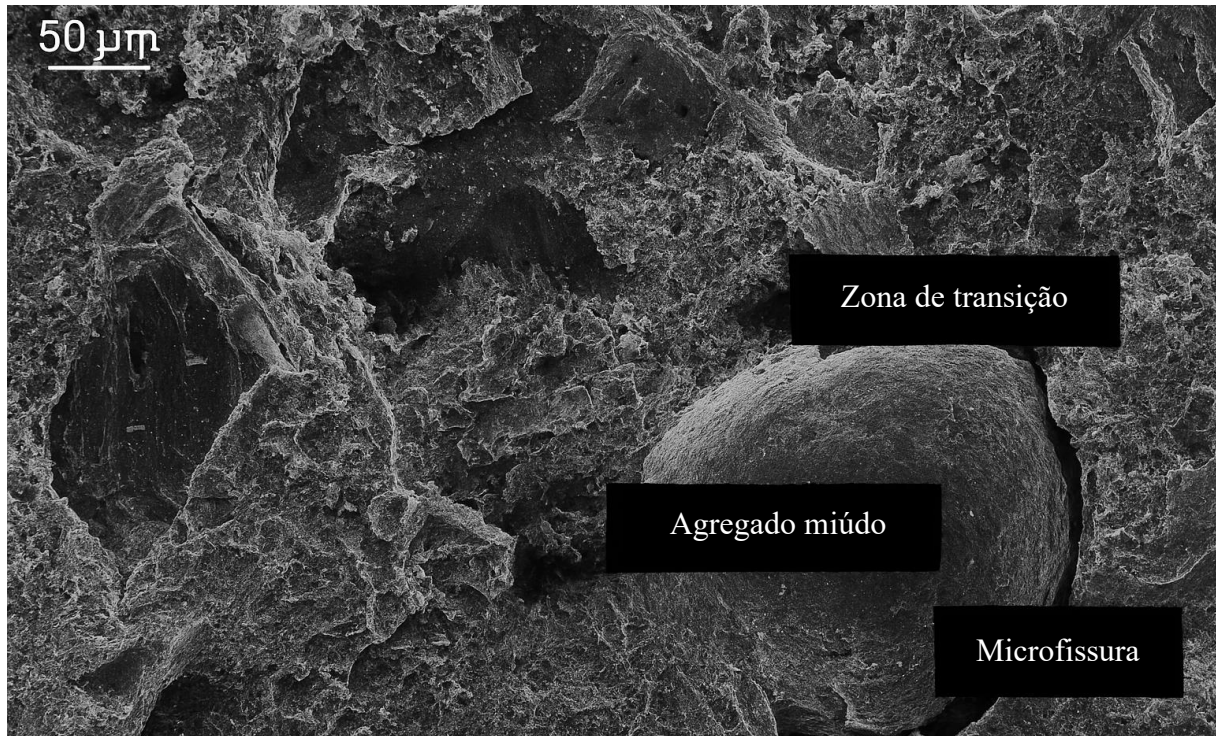
De acordo com SCRIVENER (1989), a zona de transição é uma região de alta porosidade e baixa densidade, formada na interface entre a pasta de cimento e o agregado gráudo. Além disso, ele também afirma que essa região é crítica pois pode crescer significativamente a permeabilidade do concreto. A Figura 09 traz uma representação esquemática da zona de transição em concretos e a Figura 10 trata-se de uma micrografia, realizada através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), de um concreto.

Figura 09: Representação esquemática da zona de transição em concretos.



Fonte: MEHTA e MONTEIRO (2014).

Figura 10: Micrografia de um concreto por meio do MEV.



Fonte: SILVA, GACHET e LINTZ (2020).

Outros autores destacam esse impacto da zona de transição na permeabilidade, de acordo com BASHEER et al. (2001), "a zona de transição pode ser mais permeável do que a pasta de cimento e o agregado graúdo, o que pode levar a uma maior permeabilidade do concreto", ZHANG et al. (2010) também afirmam que "a zona de transição pode ser uma região crítica para a permeabilidade do concreto, pois pode permitir a entrada de água e íons agressivos na estrutura do concreto".

2.5 Difusão e Aplicação das Leis de Fick

A difusão é um outro mecanismo de transporte no concreto, diferente da permeabilidade, que funciona a partir de gradientes de pressão, a difusão permite o ingresso de substâncias devido a uma diferença de potencial químico (RIBEIRO, 2021).

Esse mecanismo é regido pelas leis de Fick, sendo elas fundamentais para entender o funcionamento desse fenômeno no concreto. A primeira lei de Fick, a qual diz respeito à regimes estacionários, estabelece que a taxa de fluxo de um fluido através de uma superfície é proporcional à concentração do fluido e à área da superfície (FICK, 1855). Essa relação é regida pela seguinte equação:

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

Onde o fluxo de difusão (J) é igual ao gradiente de concentração (dC/dx) multiplicado pelo coeficiente de difusão (D), o qual entra negativo na equação porque o fluxo ocorre na direção contrária à do gradiente de concentração (saindo das altas concentrações para as baixas concentrações).

Na prática, a primeira lei de Fick é usada para medir a taxa de fluxo de um fluido (líquido ou gasoso) através de uma amostra de concreto, medição essa que pode ser feita utilizando um dispositivo de permeabilidade, como um permeâmetro. Além disso, é preciso medir a concentração do fluido em diferentes pontos da amostra de concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014), o que pode ser feito utilizando técnicas como a espectroscopia de ressonância magnética ou a cromatografia gasosa.

A segunda lei de Fick, que trata de regimes não estacionários, estabelece que a taxa de fluxo de um fluido através de uma superfície é proporcional à diferença de concentração do fluido entre as duas superfícies (FICK, 1855).

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_t}}\right)$$

Onde a diferença entre a concentração a uma distância “x” (C_x) e a concentração inicial (C_0), dividido pela diferença entre a concentração dos átomos se difundindo na superfície (C_s) e a concentração inicial (C_0), é igual a um menos a função de erro gaussiana da distância (x) dividida por duas vezes a raiz quadrada do coeficiente de difusão pelo tempo (D_t).

2.6 Absorção capilar

Outro mecanismo de transporte relevante é a absorção capilar, sendo ela resultado de um gradiente de umidade, isto é, por causa da atuação da tensão superficial sobre os poros capilares (RIBEIRO, 2021).

BASHEER et al. (2001) afirma que, para além da microestrutura do concreto, o grau de saturação também impacta a absorção capilar. A absorção capilar do concreto ocorre quando água livre na superfície externa é succionada para o interior da matriz por efeito dos poros capilares. Esse transporte se dá predominantemente em poros com diâmetros entre 0,01 μm e 10 μm , nos quais a tensão capilar gera pressões negativas que atraem a umidade em

direção ao interior do concreto (NEVILLE, 1995).

Além da microestrutura e do grau de saturação, o coeficiente de sorptividade (volume de água absorvido por unidade de área) é fortemente influenciado pela relação água/cimento, pelo grau de hidratação e pela presença de aditivos ou micropartículas que refinam a distribuição de poros (BASHEER et al., 2001). Concretos com baixa relação a/c e cura adequada apresentam menor sorptividade pois a rede capilar torna-se mais tortuosa e descontínua, diminuindo a conectividade entre os poros (MEHTA; MONTEIRO, 2014), enquanto a presença de fillers, partículas extremamente finas, permitem o crescimento dos produtos da hidratação do cimento, dessa forma gerando uma matriz mais densa e com menor índice de vazios (FRANÇA, 2021).

A aferição da absorção capilar se dá através do ensaio regido pela ABNT NBR 9779:2012, sendo o coeficiente de absorção de água por capilaridade (C , em g/cm^2) vinculado à diferença entre massa saturada (m_{sat} , em g), massa seca (m_s , em g) do corpo de prova e à área da seção transversal (A , em cm^2), conforme apresentado na equação a seguir:

$$C = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{A}$$

Quanto ao embasamento teórico do ensaio, a teoria do fluxo insaturado em solos auxilia no entendimento das leis de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo (AL-NADDAF, 2018). Consequência da extrapolação da equação de Darcy, para um sólido poroso inicialmente seco, a massa de água absorvida (Δm) é proporcional à raiz quadrada do tempo (t), relacionando a área superficial em contato com a água (A) e uma constante característica do material (k) (GUMMERSON; HALL; HOFF, 1980), dessa forma, a equação anterior apresenta uma equivalência à seguinte:

$$C = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{A} = k \cdot \sqrt{t}$$

2.7 Agressividade do Ambiente

A agressividade do ambiente é um fator fundamental que afeta a durabilidade do concreto, PONTES (2006) diz que as edificações próximas ao mar tendem a se deteriorar mais precocemente devido ao ambiente altamente agressivo, PORTELLA (2013) detalha que, em um cenário de ambiente marinho, os íons cloreto dispersos na atmosfera são a causa mais

significativa das manifestações patológicas tendo em vista sua agressividade às armaduras (tal assunto será melhor detalhado no Capítulo 4), tal fenômeno é extremamente problemático para um país como o Brasil, o qual detém de 7.367 km de litoral (INMET, 2017). SILVA (2011) estabelece que a escolha da classe de agressividade ambiental é fundamental na definição da classe de resistência do concreto a ser adotada (F_{ck}), do cobrimento nominal das armaduras e da relação água/cimento.

A NBR 6118:2023 define as classes de agressividade do ambiente para concretos em geral, ela conceitua, em linhas gerais, agressividade ambiental como as ações que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações térmicas, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas.

De acordo com a NBR 6118:2023, as classes de agressividade ambiental (CAA) são (Tabela 02):

Tabela 02: Classes de agressividade ambiental (CAA) conforme a NBR 6118:2023.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submerso	
II	Moderada	Urbano a, b	Pequeno
III	Forte	Marinho a	Grande
		Industrial a, b	
IV	Muito forte	Industrial a, c	Elevado
		Respingos de maré	
<p>a. Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos (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,</p>			

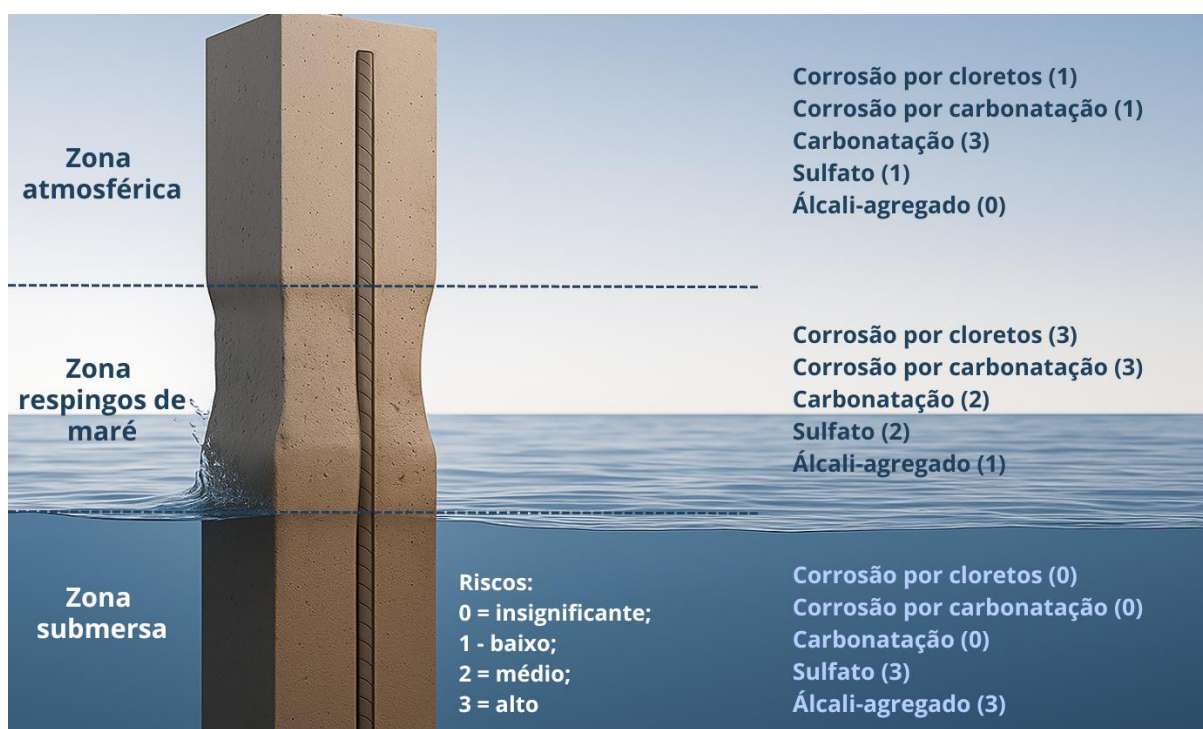
branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas, elementos em contato com solo contaminado ou água subterrânea contaminada.

Fonte: ABNT NBR 6118:2023.

Além dos aspectos mecânicos, a agressividade do ambiente também pode influenciar a permeabilidade do concreto, pois ambientes mais agressivos podem levar a uma maior permeabilidade (BERTOLINI et al., 2004).

MEHTA e MONTEIRO (2014) apresentaram um esquema visual o qual demonstra de forma direta o impacto do ambiente sobre uma peça de concreto armado, na representação (Figura 11), o elemento estrutural de concreto está inserido em três CAA, onde parte dele está submerso (CAA I), o trecho intermediário está na região de variação de maré (respingos de maré – CAA IV) e, por fim, o topo está em contato com o ar atmosférico continuamente (CAA III), ao lado da peça, está o grau de risco (variando de zero a três) de cada manifestação patológica ocorrer no trecho em questão.

Figura 11: Grau de risco das principais manifestações patológicas com base no meio ambiente.



Fonte: Adaptado de MEHTA e MONTEIRO (2014).

2.8 Indicadores de durabilidade

A fim de garantir o desempenho adequado e a vida útil estimada para a estrutura, é mister a aferição e a análise dos “indicadores de durabilidade”, termo usado por RIBEIRO (2021), os quais, quando devidamente relacionados às condições ambientais, contribuem consideravelmente para o controle dos agentes deletérios que ingressam no concreto pelos diferentes mecanismos de transporte (CASCUDO, 2017). Assim, além do controle, CASCUDO (2017) também afirma que esses indicadores auxiliam na prevenção de manifestações patológicas.

RIBEIRO (2021), sumariza a partir do guia da *Association Française de Génie Civil* (Associação Francesa de Engenharia Civil – AFGC), estabelece quatro indicadores:

- Porosidade ($P_{\text{água}}$ em %): Obtida, em percentual, através do ensaio de absorção de água por imersão, regido pela ABNT NBR 9778:2005;
- Coeficiente de permeabilidade à água (K_{liq} em $\times 10^{-18} \text{ m}^2$): Obtido através de ensaio, onde o corpo de prova é disposto em um bujão envolto por água aquecida, regido pela ABNT NBR 10786:2013;
- Coeficiente de difusão de cloretos ($D_{\text{a(mig)}}$ $\times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$): Obtido pelo ensaio de migração de cloretos, apesar de não ter normativa no Brasil, as NT Build 443 e NT Build 492 fornecem parâmetros diretamente associados à difusão de cloretos (CASCUDO, LOPES e OLIVEIRA, 2022);
- Coeficiente de permeabilidade ao gás ($K_{\text{gás}}$ $\times 10^{-18} \text{ m}^2$): Obtido através da submissão do CP a uma pressão de 0,2 MPa de gás oxigênio.

Cada um deles traz diferentes parâmetros os quais impactam a permeabilidade e os demais mecanismos de transporte, que estão intimamente relacionados à durabilidade do material. A Tabela 03 e a Tabela 04 foram extraídas do guia da AFGC apud BAROGUELBOUNY et al. (2014), elas trazem os valores de referência para os indicadores de durabilidade em dois cenários (corrosão induzida por carbonatação em uma peça com cobertura de 30 mm e corrosão induzida por cloretos em uma peça com cobertura de 50 mm), levando em consideração a vida útil e a categoria da estrutura em questão.

Tabela 03: Valores de referência de cada indicador de durabilidade diante de uma corrosão induzida por carbonatação (espessura de cobrimento = 30 mm).

Vida útil exigida <i>Categoria da estrutura</i>	Corrosão induzida por carbonatação (e = 30 mm)			
	Tipo de ambiente			
	Seco e muito seco ou continuamente úmido (UR < 65%)	Úmido (UR > 80%)	Moderadamente úmido (65% < UR < 80%)	Ciclos frequentes de umidificação-secagem
< 30 anos	$P_{\text{água}} < 16$	$P_{\text{água}} < 16$	$P_{\text{água}} < 15$	$P_{\text{água}} < 16$
De 30 a 50 anos <i>Edificação</i>	$P_{\text{água}} < 16$	$P_{\text{água}} < 16$	$P_{\text{água}} < 14$	$P_{\text{água}} < 14$
De 50 a 100 anos <i>Edificação e demais obras civis</i>	$P_{\text{água}} < 14$	$P_{\text{água}} < 14$	$P_{\text{água}} < 12$ $K_{\text{gás}} < 100$	$P_{\text{água}} < 12$ $K_{\text{liq}} < 0,1$
De 100 a 120 anos <i>Grande estruturas/obras de grande porte</i>	$P_{\text{água}} < 12$ $K_{\text{gás}} < 100$	$P_{\text{água}} < 12$ $K_{\text{gás}} < 100$	$P_{\text{água}} < 9$ $K_{\text{gás}} < 10$	$P_{\text{água}} < 9$ $K_{\text{gás}} < 10$ $K_{\text{liq}} < 0,01$
> 120 anos <i>Estruturas excepcionais</i>	$P_{\text{água}} < 9$ $K_{\text{gás}} < 10$	$P_{\text{água}} < 9$ $K_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{água}} < 9$ $K_{\text{gás}} < 10$ $K_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{água}} < 9$ $D_{\text{a(mig)}} < 1$ $K_{\text{gás}} < 10$ $K_{\text{liq}} < 0,01$

As unidades de medidas dos valores apresentados seguem as já apresentadas anteriormente.

Fonte: Guia AFGC apud BAROGUEL-BOUNY et al. (2014).

Tabela 04: Valores de referência de cada indicador de durabilidade diante de uma corrosão induzida por cloretos (espessura de cobrimento = 50 mm).

Vida útil exigida <i>Categoria da estrutura</i>	Corrosão induzida por cloretos (e = 50 mm)			
	Tipo de ambiente			
	[Cl ⁻] baixa*	[Cl ⁻] alta**	Imersão em água contendo cloretos	Zona de maré
< 30 anos	$P_{\text{água}} < 16$	$P_{\text{água}} < 14$	$P_{\text{água}} < 15$	$P_{\text{água}} < 14$
De 30 a 50 anos <i>Edificação</i>	$P_{\text{água}} < 15$	$P_{\text{água}} < 11$	$P_{\text{água}} < 13$	$P_{\text{água}} < 11$
De 50 a 100 anos <i>Edificação e demais obras civis</i>	$P_{\text{água}} < 14$	$P_{\text{água}} < 11$ $D_{\text{a(mig)}} < 2$ $K_{\text{liq}} < 0,1$	$P_{\text{água}} < 13$ $D_{\text{a(mig)}} < 7$	$P_{\text{água}} < 11$ $D_{\text{a(mig)}} < 3$ $K_{\text{liq}} < 0,1$
De 100 a 120 anos <i>Grande estruturas/obras de grande porte</i>	$P_{\text{água}} < 12$ $D_{\text{a(mig)}} < 20$ $K_{\text{liq}} < 0,1$	$P_{\text{água}} < 9$ $D_{\text{a(mig)}} < 1$ $K_{\text{gás}} < 10$ $K_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{água}} < 12$ $D_{\text{a(mig)}} < 5$	$P_{\text{água}} < 10$ $D_{\text{a(mig)}} < 2$ $K_{\text{gás}} < 100$ $K_{\text{liq}} < 0,05$

> 120 anos <i>Estruturas excepcionais</i>	$P_{\text{água}} < 9$ $D_{a(\text{mig})} < 10$ $K_{\text{gás}} < 10$ $K_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{água}} < 9$ $D_{a(\text{mig})} < 1$ $K_{\text{gás}} < 10$ $K_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{água}} < 9$ $D_{a(\text{mig})} < 1$	$P_{\text{água}} < 9$ $D_{a(\text{mig})} < 1$ $K_{\text{gás}} < 10$ $K_{\text{liq}} < 0,01$
As unidades de medidas dos valores apresentados seguem as já apresentadas anteriormente. * Concentração de cloretos livres na superfície ≤ 10 g/L ** Concentração de cloretos livres na superfície ≥ 100 g/L				

Fonte: Guia AFGC apud BAROGUEL-BOUNY et al. (2014).

Concluída a análise dos fatores que regem o quão fácil ou difícil será ingressar na matriz cimentícia, destacam-se agora as consequências práticas do transporte desses agentes agressivos. Uma vez ultrapassada a barreira protetora do concreto, as armaduras internas e o próprio esqueleto cimentício ficam suscetíveis a processos prejudiciais. Nos capítulos posteriores, serão investigados como a penetração de agentes deletérios, mediante aos mecanismos de transporte da pasta cimentícia, dá início e acelera o fenômeno da corrosão nas armaduras, comprometendo a integridade estrutural e exigindo medidas de prevenção e correção personalizadas.

CAPÍTULO 3 – CORROSÃO EM CONCRETO ARMADO

“A corrosão provoca não somente a sua deterioração, mas também pode afetar a estabilidade e a durabilidade das estruturas.”
(GENTIL, 2011).

3.1 Definições e Conceitos fundamentais

A corrosão das armaduras é uma das principais manifestações patológicas que afetam a durabilidade e a integridade das estruturas de concreto e tem sido uma preocupação significativa desde o início do uso desse material. Inicialmente, o concreto armado era considerado resistente à corrosão devido à sua elevada alcalinidade. Contudo, com o passar do tempo e a observação de casos de deterioração prematura – sobretudo em ambientes agressivos, como os litorâneos – tornou-se evidente a necessidade de um estudo mais aprofundado do fenômeno (NEVILLE, 1995). Apesar de mais intenso em regiões costeiras, praticamente todas as estruturas estão sujeitas a essa ação deletéria, o que faz demandar um custo oneroso para a manutenção contra esse fenômeno. A Torre Eiffel é um exemplo emblemático de quão custoso pode ser a prevenção à corrosão, a famosa torre parisiense demanda um investimento em torno de 60 milhões de euros ou 383 milhões de reais (considerando a cotação do euro de 6,39 reais) a cada sete anos para aplicação de tinta protetora (CNN BRASIL, 2022), fatos como esse e outros são o que impulsionam o desenvolvimento de métodos de diagnóstico e reparo mais eficazes, além de incentivar a pesquisa por materiais e tecnologias inovadoras para a proteção do aço (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 2011). No caso das estruturas de concreto, trata-se do processo de oxidação das armaduras de aço, o que pode resultar na formação de produtos de corrosão com maior volume que o aço original, comprometendo a integridade estrutural (ANDRADE e SILVA, 2008). Segundo FORTES (1995), a corrosão gera, destacadamente, três consequências as quais impactam diretamente o desempenho da estrutura, são elas:

- Aderência entre o aço e o concreto: A aderência entre o aço e o concreto é prejudicada pelo acúmulo de produtos de corrosão ao longo da armadura;

- Redução da área da seção transversal das barras de armadura: Ao ser atacada por agentes deletérios, e.g. os íons cloreto, são formados “pites” ao longo da armadura. A formação desses pites pode comprometer a seção da barra de modo a reduzi-la até sua ruptura;
- Desenvolvimento de tensões internas de tração: Os produtos formados na corrosão, ocupam um volume maior (de 3 a 10 vezes) que os reagentes presentes na armadura de aço original. Este aumento volumétrico faz surgir elevadas tensões internas na interface aço-concreto (podendo ser superiores a 15 MPa), o que leva a fissuração da peça de concreto e, conseqüentemente, facilita a penetração de agentes agressivos.

Na Figura 12, é possível verificar o dano causado pela corrosão em uma viga de concreto armado. Pela imagem, nota-se a presença das três conseqüências agindo simultaneamente.

Figura 12: Corrosão em uma viga de concreto armado.



Fonte: Fotografado pelo autor.

3.2 Mecanismo da reação

No concreto armado, segundo HELENE (1986), o mecanismo predominante de corrosão é o eletroquímico, onde o aço sofre a oxidação. Antes de adentrar na corrosão do concreto armado, faz-se necessário apresentar os fundamentos da corrosão eletroquímica. GENTIL (2011) define os constituintes da oxirredução, em termos de elétrons, como: a espécie química que perdeu elétrons sofreu oxidação, enquanto a espécie química que ganhou elétrons passou por uma redução, esse conceito é primordial pois é o que fundamenta a corrosão eletrolítica, onde um material tem excesso de elétrons e outro tem deficiência, ao entrarem em contato, a busca pelo equilíbrio gera a transferência de elétrons, em termos químicos, cada material é chamado de “eletrodo” e a diferença de elétrons entre eles consiste na “diferença de potencial eletroquímico”. Cada substância química possui um potencial eletroquímico, LATIMER (1952) elaborou uma vasta tabela a qual demonstra o potencial de oxidação e o potencial de redução de diversas espécies químicas.

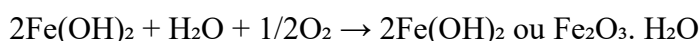
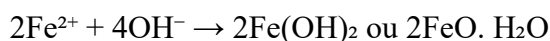
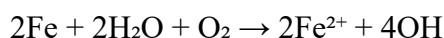
Quando os eletrodos estão interligados e há diferença de potencial eletroquímico, e conseqüentemente transferência de elétrons, chama-se esse sistema de “pilha eletroquímica” e o processo que ocorre em cada eletrodo lhe garante um nome específico, GENTIL (2011) afirma que o eletrodo que está em processo de oxidação é cunhado de “ânodo” e o eletrodo o qual está em redução é chamado de “cátodo”.

Especificando para o concreto armado, de forma geral, tem-se o aço das armaduras (ricas em ferro) e o gás oxigênio atmosférico, de acordo com RIBEIRO (2010), a reação eletrolítica entre esses materiais ocorre da seguinte forma:

Na região anódica, o ferro sofre oxidação enquanto, na região catódica, ocorre a redução do oxigênio, em presença de água, através da reação:

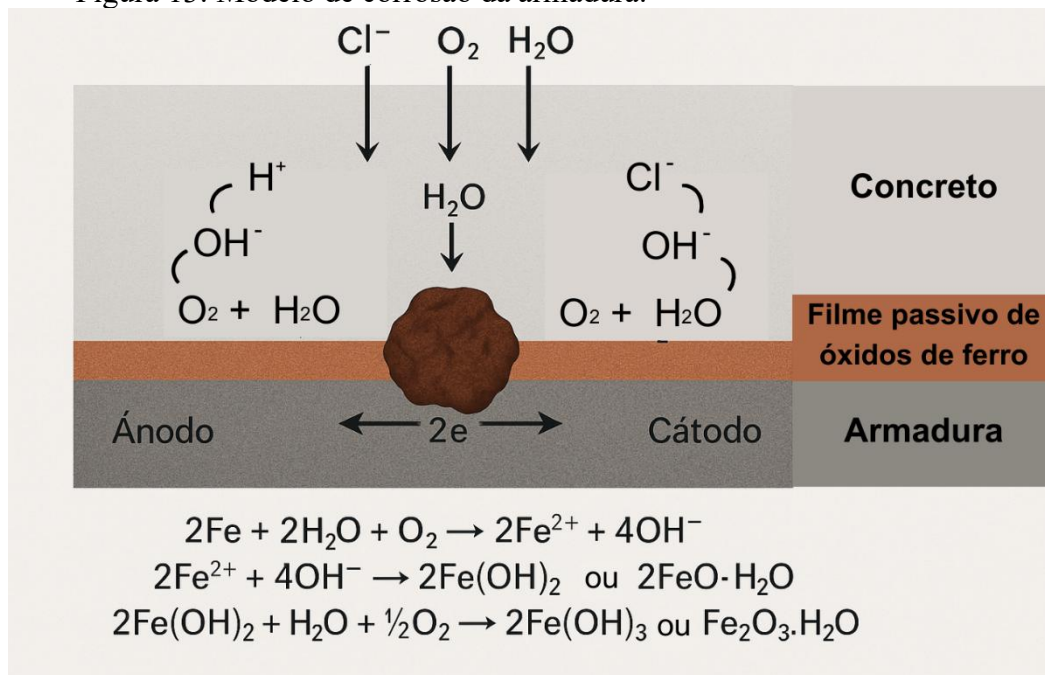


Os íons Fe^{2+} formados no ânodo reagem com os íons hidroxila, originando o hidróxido de ferro:



O mecanismo de funcionamento da reação foi representado de forma ilustrativa na Figura 13.

Figura 13: Modelo de corrosão da armadura.



Fonte: Adaptado de TREADAWAY (1988).

3.3 Principais tipos de corrosão

A literatura destaca três principais tipos de corrosão, são eles:

- Corrosão por carbonatação: A carbonatação ocorre quando o dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera penetra no concreto e reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formando carbonato de cálcio (CaCO_3). Esse fenômeno reduz o pH do concreto e elimina a camada passivadora que protege o aço, possibilitando o início da corrosão (SOUSA et al., 2012). Esse fenômeno será melhor detalhado no Capítulo 5.
- Corrosão induzida por cloretos: Resultado da penetração de íons cloreto (Cl^-) provenientes geralmente de sais de degelo ou ambientes marinhos, os quais rompem a camada passivadora do aço, iniciando a corrosão localizada que pode comprometer significativamente a resistência da estrutura (ANDRADE e SILVA, 2008). Esse tipo será abordado no capítulo seguinte.
- Corrosão galvânica: Ocorre quando há contato entre dois metais diferentes, estabelecendo uma célula galvânica, a diferença de potencial elétrico gera uma transferência de elétrons, é caracterizada por apresentar corrosão localizada próxima à região de contato entre os metais, ocasionando perfurações no metal que funciona como ânodo (GENTIL, 2011).

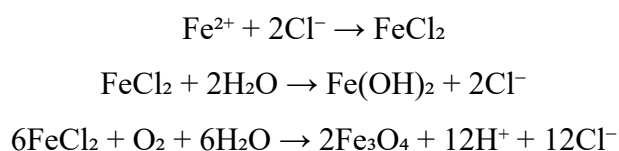
CAPÍTULO 4 – CORROSÃO INDUZIDA POR CLORETOS

“A corrosão induzida por cloretos é a principal fonte de deterioração em estruturas de concreto armado.” (FRANÇA, 2011).

4.1 *Conceitos fundamentais e mecanismo da reação*

Segundo AL-DULAIJAN et al. (2003), os íons cloretos são a principal causa de degradação das estruturas de concreto armado. Em regiões marítimas, os íons cloreto contidos na névoa salina tratam-se da forma mais significativa de manifestações patológica em estruturas de concreto armado expostas nesse ambiente (PORTELLA, 2013). Quanto a esse tipo de corrosão, diferentemente da carbonatação, ela é capaz de despassivar a armadura mesmo em condições de pH elevado (HELENE, TUTIKIAN e BOLINA, 2019). Quando grandes quantidades de íons cloreto estão presentes, o concreto tende a reter mais umidade, o que leva à diminuição da resistividade elétrica (MEHTA e MONTEIRO, 2014). O mecanismo fundamental da corrosão induzida por cloretos parte do processo de penetração desses íons agressivos, oriundos especialmente da névoa marinha, das zonas de respingo de maré e de solos contaminados, na matriz de concreto. Inicialmente, os cloretos difundem-se pelo sistema capilar do concreto, um meio que, apesar de sua porosidade aparente, pode conter canais de difusão que facilitam o transporte desses íons (NEVILLE, 1995). O processo é regido essencialmente pelas leis de Fick (detalhadas no Capítulo 2), sendo a permeabilidade um fator determinante para a taxa de penetração dos cloretos.

Uma vez que os íons cloreto alcançam a interface entre o concreto e o aço, ocorre a quebra da camada passivadora naturalmente formada em função da alcalinidade do concreto. Essa camada protetora é responsável por limitar as reações eletroquímicas em superfícies metálicas, mas a presença de cloretos em concentrações críticas interfere no equilíbrio, promovendo a despassivação do aço (ANDRADE e SILVA, 2008). Em termos eletroquímicos, HELENE (1997) descreve que as reações entre os íons cloreto e as armaduras de aço se dão da seguinte forma:



A partir dessas reações, percebe-se que os íons cloreto não são consumidos ao longo da reação, de maneira que esses íons livres reiniciam continuamente a pilha eletroquímica agravando a corrosão, diante desse efeito continuado, a ABNT NBR 12655:2022 restringe o teor de íons cloreto (percentual sobre a massa de cimento) em 0,05% para concreto protendido; em 0,15% para concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura; em 0,30% para concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura e em 0,40% para concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura). Internacionalmente, os valores limites são semelhantes para estruturas de concreto armado convencional, conforme demonstrado na Tabela 05.

Tabela 05: Valor crítico de íons cloreto em diferentes normas estrangeiras.

País	Norma	Limite máximo de cloreto em relação à massa de cimento
Brasil	NBR 12655:2022	0,05% para concreto protendido
		0,15% para concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura
		0,30% para concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura
		0,40% para concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)
Estados Unidos	ACI 318	0,15% em ambiente de Cl ⁻
		0,30% em ambiente normal
		1,00% em ambiente fresco
Austrália	AS 3600	0,22%
Espanha	EH 91	0,40%
Europa	Eurocode 2	0,22%
Japão	JSCE-SP 2	0,60 kg/m ³ em relação à massa de concreto fresco

Fonte: Adaptado de GENTIL (2011) e PELLIZZER (2015).

Conforme definido pela normativa citada, a concentração de íons cloreto é um fator extremamente relevante na durabilidade das estruturas de concreto, assim, existem alguns ensaios que podem ser feitos para obtenção aproximada desse teor na condição atual e futura da estrutura, como:

- Penetração acelerada de íons cloreto: Para esse ensaio, são moldados corpos de prova com o traço e os materiais que serão utilizados para o concreto, já endurecidos, o corpo de prova é acoplado entre duas meia-células acrílicas, uma

contendo uma solução aquosa de cloreto de sódio e outra com uma solução aquosa de hidróxido de sódio (CABRAL et al., 2019);

- Recolhimento do pó de concreto: Esse método é bastante empregado na avaliação de estruturas já existentes, consiste na execução de furos a profundidades crescente onde o pó de concreto gerado é recolhido (aproximadamente 25 gramas) e analisado em laboratório a fim de obter a concentração de sais cloretos na amostra, muitas vezes os primeiros milímetros da extração (até dez milímetros) são desprezados por conterem excesso de sais (RIBEIRO, 2021);
- Ensaios de resistividade elétrica: Apesar de não mensurarem a concentração de cloretos diretamente, esses ensaios avaliam a capacidade do concreto em conduzir corrente elétrica, sendo uma ferramenta auxiliar para estimar a taxa de penetração dos íons e o risco de iniciação da corrosão (COSTA et al., 2015).

Cada uma dessas técnicas, quando utilizadas de forma integrada, permite um diagnóstico preciso e uma avaliação do estágio de deterioração da estrutura, mas é importantíssima a implementação de um sistema de monitoramento contínuo para a garantir a segurança estrutural e evitar custos de reparo mais elevados (IEC, 2020).

4.2 Fontes de íons cloreto nas estruturas de concreto

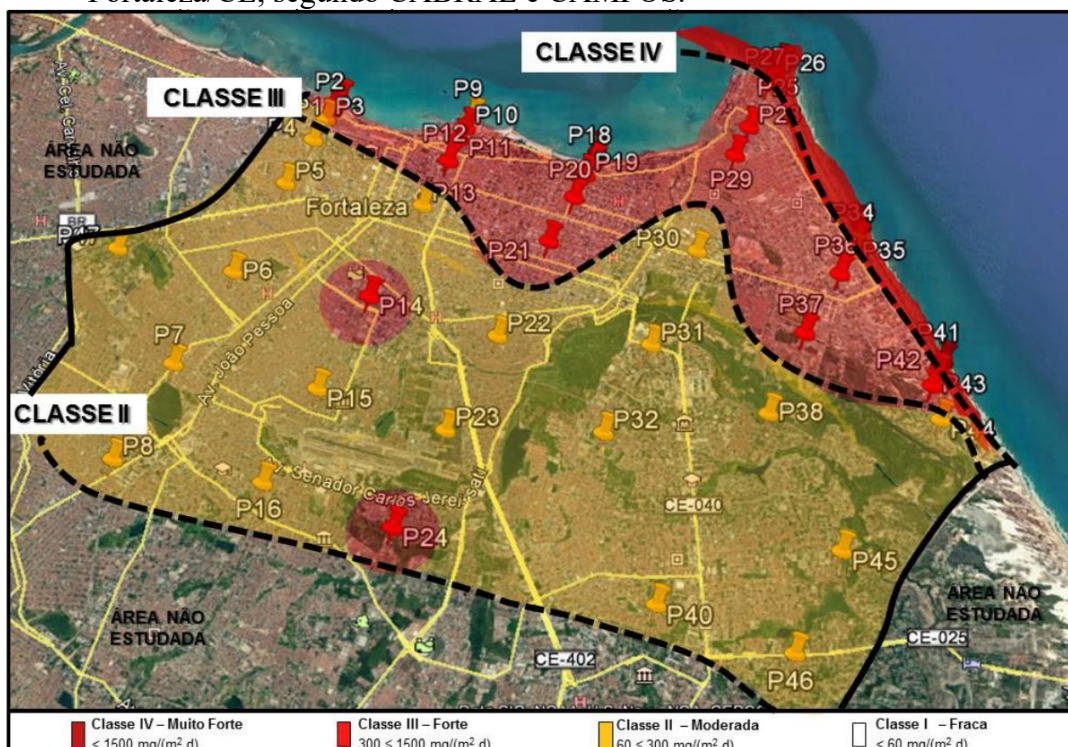
Já cientes do mecanismo de reação e de outros conceitos fundamentais, é vital identificar a origem dos íons cloreto que contribuem para a degradação da estrutura, RIBEIRO (2021) cita algumas formas comuns em que ocorre a incorporação de íons cloreto no concreto, pedagogicamente, decidiu-se categorizar em dois grupos: fontes intrínsecas e fontes extrínsecas.

- Fontes intrínsecas: A incorporação de íons cloreto se dá devido aos próprios materiais constituintes do concreto, muitas vezes, por desconhecimento técnico e de forma involuntária, utiliza-se aditivos aceleradores de pega, agregados ou água contaminada os quais adicionam esse agente agressivo ao concreto já no momento de sua concepção (RIBEIRO, 2021).
- Fontes extrínsecas: Diferentemente do anterior, os íons cloretos advindos dessas fontes necessitam penetrar no interior da peça para atingir a armadura de aço, os agentes agressivos são fornecidos pelo meio externo, e.g., névoa salina, resíduos industriais, piscinas e outras fontes (RIBEIRO, 2021).

4.3 Impacto do meio ambiente sobre a velocidade de corrosão

Outro parâmetro importante a ser comentado, conforme já apresentado no Capítulo 2, é o forte impacto do meio ambiente sobre a velocidade de corrosão. As estruturas em regiões de respingos de maré (Classe IV) apresentam uma deterioração por corrosão mais acelerada por se situarem de um ambiente mais agressivo do que as estruturas localizadas em regiões rurais (Classe I) ou urbanas (Classe II), por exemplo. Além da classificação geral feita pela norma, a elaboração de estudos específicos da localidade pode se mostrar extremamente vantajoso, visto que possibilitam a concepção de um projeto mais bem ajustado às condições do lugar onde a edificação se situará, assim, aumentando a vida útil da edificação (CABRAL e CAMPOS, 2016). Um caso prático desse tipo de análise mais localizada ocorreu em Fortaleza/CE no ano de 2016, CABRAL e CAMPOS distribuíram velas úmidas (ABNT NBR 6211:2001) pela cidade, totalizando 46 pontos de coleta, os quais se distanciavam da orla de 50 a 8.000 metros. As velas tinham o objetivo de verificar o teor de cloretos em suspensão no ar atmosférico, feita a coleta de todas as velas e determinados os teores de cloreto, os pesquisadores propuseram, com base na segunda Lei de Fick, um mapa específico das zonas de agressividade para o município de Fortaleza/CE, demonstrado na Figura 14.

Figura 14: Classificação das zonas de agressividade do município de Fortaleza/CE, segundo CABRAL e CAMPOS.



Fonte: CABRAL e CAMPOS (2016).

4.4 Medidas de correção

Estando o processo corrosivo em operação, faz-se necessário a tomada de medidas para combater a deterioração da estrutura pois ela leva a perda de seção transversal, algo extremamente danoso ao concreto armado, visto que a armadura é a responsável por suportar quase inteiramente os esforços de tração originados pela flexão nas vigas e lajes, logo, a área transversal de aço é um parâmetro fundamental. O Capítulo 8 traz um estudo de caso do reparo e reforço estrutural da Ponte dos Ingleses, localizada no município de Fortaleza/CE, estando ela em avançado estágio de degradação, o projetista Joaquim Eduardo Mota recomendou uma série de medidas para o tratamento e condicionamento da estrutura, além das tais, o engenheiro civil estrutural Augusto Teixeira de Albuquerque esquematizou as intervenções em três níveis (percentual menor que 10%, entre 10% e 30% e superior a 30%).

- No caso das armaduras em que não houve rompimento ou com perda de seção inferior à 10%, considera-se que a armadura ainda está em condições de resistir ao esforço para qual foi concebido, assim, será feita uma limpeza da superfície e aplicar-se-á um inibidor de corrosão (visando a passivação do aço);
- Quando o percentual corroído é superior a 10% e inferior a 30%, faz-se necessário uma armadura complementar com a finalidade de recompor o aço da peça estrutural, a especificação dessa armadura complementar (resistência, diâmetro e afins) é fornecida pelo projetista, que deve considerar as condições as quais a estrutura está submetida com o objetivo de conceber um projeto adequado à realidade do local;
- Caso a armadura esteja rompida ou com perda de seção superior à 30%, a armadura existente é desprezada e se torna necessária a instalação de uma nova armadura a fim de garantir a área transversal de aço necessária à peça. O valor de 30% funciona como um guia prático fundamentado nas experiências empíricas de engenheiros projetistas do ramo da recuperação estrutural, funcionando como um ponto de inflexão onde a perda de resistência se torna estruturalmente crítica e a mera limpeza e recobrimento não são suficientes para garantir a capacidade de carga de uso ou a segurança a longo prazo. Outro aspecto importante, além da segurança estrutural, é a ductilidade do concreto armado, a armadura tem a função de tornar o compósito menos frágil, isto é, faz

com que peça apresente deformações notórias em caso de falha, ao invés de romper abruptamente.

Tais medidas devem ser tomadas em um cenário que o processo corrosivo já está instalado, mas também existem medidas as quais previnem e/ou minimizam a degradação das estruturas de concreto armado por corrosão.

4.5 Medidas de prevenção

A fim de garantir o prolongamento da vida útil da edificação e a redução de despesas com manutenções corretivas ao longo do seu tempo de serviço, algumas medidas preventivas podem ser tomadas desde a concepção do projeto à utilização da estrutura, pode-se citar:

- Espessura de cobrimento adequado das armaduras: Segundo HELENE (2021), uma redução da espessura de cobrimento das armaduras de 30 mm para 25 mm pode implicar, em alguns casos, em uma redução de 15 anos na vida útil de uma estrutura, demonstrando a importância dessa medida na durabilidade do sistema estrutural, visto que ela dificulta a entrada de agentes deletérios. A ABNT NBR 6118:2023 define a espessura de cobrimento adequada para diferentes classes de agressividade, tais espessuras foram apresentadas na Tabela 06;

Tabela 06: Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $c = 10$ mm.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga ^b / pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga / pilar	30	35	45	55
^a	Cobrimento nominal da bainha 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 que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevados desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta tabela podem ser substituídas pelas aplicáveis (conforme preconizado pela NBR 6118:2023), respeitando um cobrimento nominal ≥ 15 mm.
- ^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe agressividade IV.
- ^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter comprimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: ABNT NBR 6118:2023

- Concreto com baixa relação água-cimento: A utilização de um concreto com baixa relação água/cimento (conforme demonstrado no Capítulo 2) reduz a interconectividade dos poros do concreto, assim limitando a difusão de agentes corrosivos;
- Estudo dos agregados: Como apresentado nas fontes intrínsecas, os íons cloreto podem ser incorporados ao concreto já no momento de sua confecção devido à utilização de agregados “contaminados”, assim, um estudo prévio da composição mineralógica e química dos agregados empregados pode prevenir essa fonte de ataque;
- Adições minerais: A incorporação de adições minerais, e.g., o metacaulim (composto basicamente por sílica e alumínio amorfo), contribui para o aumento da resistência à compressão e da durabilidade, pois proporciona a formação de uma estrutura de poros de tamanhos menores, os quais dificultam o ingresso de agentes deletérios (FONSECA, 2010);
- Inibidores de corrosão: Usados de forma cada vez mais crescente, os inibidores de corrosão podem ser incorporados ao concreto como qualquer outro aditivo (atuando com uma medida profilática) ou aplicada sobre as armaduras (podendo tanto ser usado na prevenção como na correção, como disposto na seção anterior), facilitando sua utilização por não demandar mão-de-obra especializada. Os inibidores atuam bloqueando o ramo anódico (inibidor anódico) ou o ramo catódico (inibidor catódico) ou até mesmo ambos (inibidor

misto), dessa forma, rompendo a continuidade do circuito eletroquímico (LIMA, 2000);

- Proteção catódica: Consiste em fornecer, à superfície que deseja proteger, um fluxo regular de elétrons, logo, induzindo a ocorrência de somente reações catódicas, o que evita o desgaste da estrutura, esse fornecimento de elétrons pode se dar por meio de dois sistemas, são eles: o sistema de corrente impressa e o sistema galvânico (IEC, 2020).

CAPÍTULO 5 – CARBONATAÇÃO E SEUS EFEITOS NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

“O aumento das emissões de CO₂ na atmosfera, traz consequências diretas às estruturas construídas em ambiente urbano.” (NEVILLE, 1997)

5.1 Definições e Conceitos

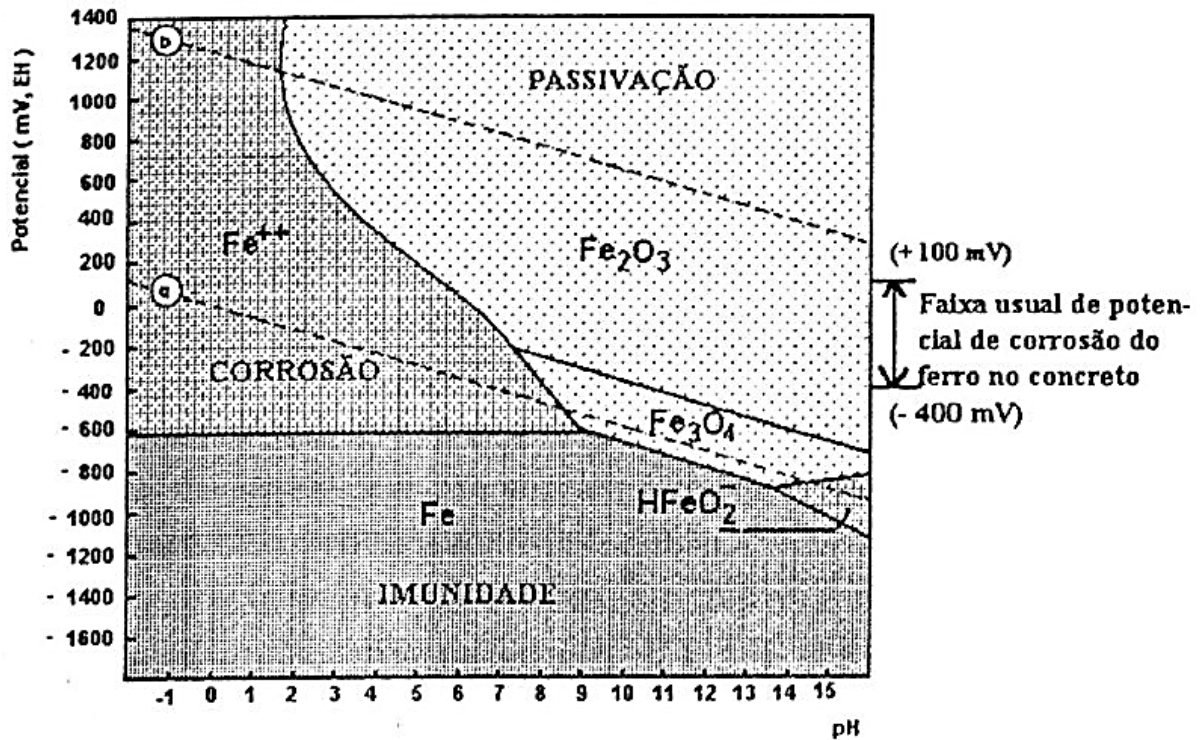
A carbonatação é um processo químico que ocorre em estruturas de concreto, causando danos significativos à sua durabilidade. É um dos principais mecanismos de degradação do concreto, acompanhado pela corrosão induzida por íons cloreto e pela deterioração por gelo e degelo (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A carbonatação é um processo químico que envolve a reação entre o dióxido de carbono (CO₂) presente no ar e a cal (Ca(OH)₂) presente no concreto, formando carbonato de cálcio (CaCO₃) (TAYLOR, 1997). Essa reação causa a redução do pH do concreto, tornando-o mais ácido e propício à corrosão das armaduras.

A redução do pH no concreto é um fator crítico que acelera a corrosão das armaduras de aço. Isso ocorre porque a redução do pH altera o equilíbrio químico do sistema, tornando-o mais favorável à corrosão. O pH (potencial de hidrogênio) indica o teor de íons hidroxila (OH⁻) e hidrogênio (H⁺) presentes no meio, logo uma redução no pH sinaliza uma diminuição de íons OH⁻ (menos básico), enquanto um aumento no pH aponta para um aumento de íons OH⁻ (mais básico).

De acordo com o diagrama de Pourbaix, gráfico que relaciona o potencial de corrosão com o pH de uma solução (POURBAIX, 1974), a redução do pH pode levar a uma condição de corrosão mais agressiva. No caso do aço, conforme pode ser visto na Figura 15, o diagrama mostra que, em um concreto com condições de pH normal, isto é, entre 12,5 e 13, o aço está em uma região de passivação, onde a ocorrência de corrosão é minimizada. No entanto, quando o pH é reduzido, o aço entra em uma região de corrosão ativa, onde a taxa de corrosão aumenta significativamente.

Figura 15: Diagrama de Pourbaix para o sistema Fe-H₂O, a 25°C, demonstrando as regiões de corrosão, de passivação e de imunidade.

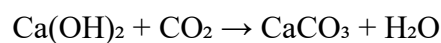


BOHNI (2005) afirma que a redução do pH é um fator crítico que pode levar a uma corrosão mais agressiva do aço. Além disso, BOHNI (2005) também destaca que a presença de íons cloreto, que são comuns em ambientes marinhos, pode ainda aumentar a taxa de corrosão.

Portanto, a redução do pH no concreto é um fator importante que deve ser considerado na avaliação da corrosão das armaduras de aço. A manutenção de um pH estável e alto é fundamental para minimizar a corrosão e garantir a durabilidade das estruturas de concreto.

5.2 Mecanismo da reação

Tratando do mecanismo químico da carbonatação, a reação pode ser representada pela equação simplificada:



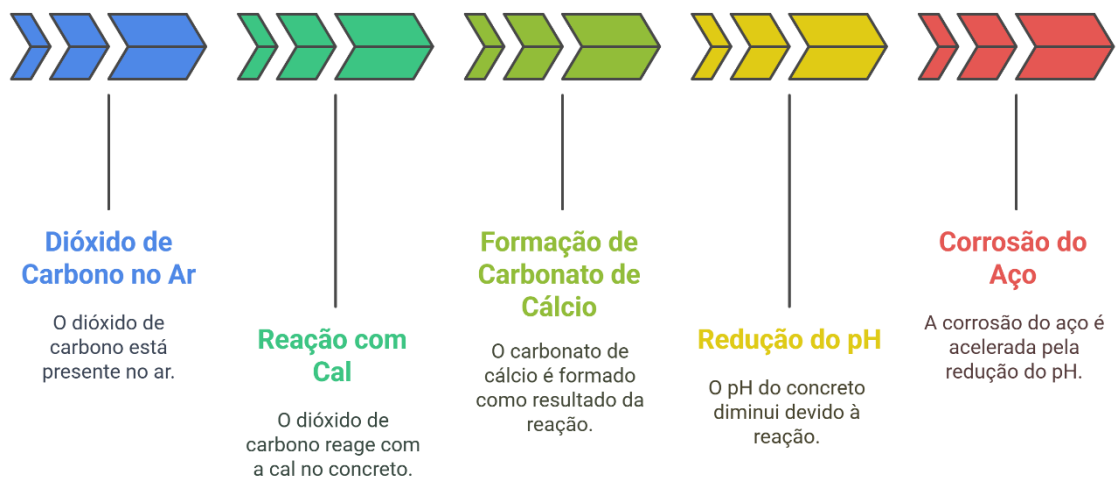
Segundo PARROT (1996) e BAROGHEL-BOUNY (1994), a reação do Ca(OH)₂ com o CO₂ é a que se produz majoritariamente, enquanto a reação com o C-S-H ocorre apenas

na carbonatação acelerada. Essa reação é influenciada por fatores como a concentração de CO_2 , a temperatura, a umidade, a relação água-cimento, a granulometria, as adições minerais e a porosidade do concreto (BIER, 1986; HOUSTON e WITTMANN, 2002).

A carbonatação ocorre principalmente na superfície externa do concreto, onde a concentração de CO_2 é mais elevada (MEHTA e MONTEIRO, 2014), fato esse que é agravado no ambiente urbano. A reação de carbonatação causa a formação de uma camada de carbonato de cálcio na superfície do concreto, que pode atingir até 10 mm de espessura (TAYLOR, 1997).

Sistematicamente, a Figura 16 traz uma representação visual do processo de carbonatação no concreto.

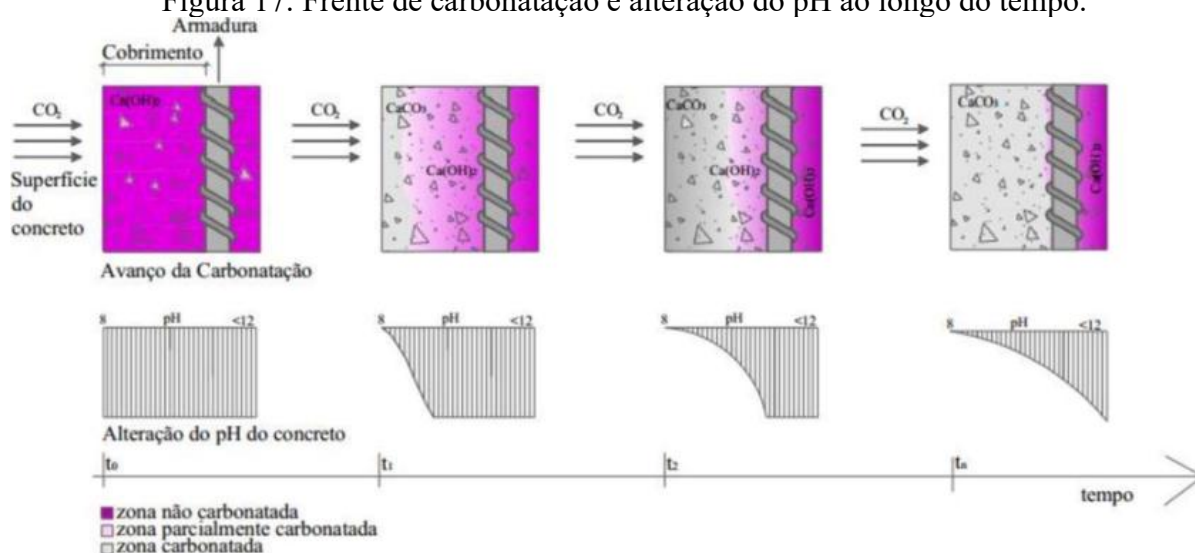
Figura 16: Esquema visual do processo de carbonatação no concreto.



Fonte: De autoria própria (gerada por IA – Napkin AI).

POSSAN (2010), ao estudar a durabilidade das estruturas de concreto armado, elaborou um esquema visual (Figura 17) que demonstra o processo de carbonatação em uma peça de concreto e, paralelamente, a redução do pH ao longo das etapas.

Figura 17: Frente de carbonatação e alteração do pH ao longo do tempo.



Fonte: POSSAN (2010).

Traçando um paralelo com o ataque por cloretos, a carbonatação age na superfície externa do concreto reduzindo o pH de forma quase uniforme, assim, sendo um ataque que atua sobre uma área, já os íons cloreto provocam a corrosão em pites, atacando o concreto armado em pontos específicos, independentemente do pH do ponto (HELENE, TUTIKIAN e BOLINA, 2019).

5.3 Ensaio para verificação da frente de carbonatação

O ensaio para verificação da frente de carbonatação em concreto, com o uso de fenolftaleína ($C_{20}H_{14}O_4$), não possui normalização vigente no Brasil, esse material é largamente usado como um indicador de pH, quando inserido em um meio básico ($pH > 7$), ela assume uma coloração magenta, enquanto que, em meio ácido ($pH < 7$), ela permanece incolor.

A RILEM (1988) discrimina o ensaio na CPC-18 (*Measurement of hardened concrete carbonation depth*). A verificação da frente de carbonatação por fenolftaleína é categorizada como um ensaio “semidestrutivo” pois provoca um certo grau de dano na estrutura, apesar de baixíssimo, eles apresentam esse ensaio a partir das seguintes etapas:

1. Extração do pó de concreto ou dos testemunhos: Extração das amostras as quais serão ensaiadas, no caso do pó de concreto, o pó oriundo de cada profundidade é categorizado;
2. Aplicação de fenolftaleína: Após ser misturada com álcool etílico, a fenolftaleína é esborrifada sobre a amostra.

3. Medição da superfície carbonatada: A partir da mudança de coloração é possível verificar a região carbonatada, aferindo a distância da superfície externa ao início da área magenta (no caso dos testemunhos) ou pela verificação das amostras que mudaram de cor (no caso das amostras de pó de concreto).

5.4 *Medidas de prevenção e outros impactos da carbonatação*

As medidas preventivas da carbonatação, por ser um fenômeno vinculado à corrosão, são semelhantes às apresentadas no capítulo anterior, mas se destacam a proteção catódica e a aplicação de revestimentos sobre a superfície do concreto.

- Proteção catódica: Esse método, como já apresentado anteriormente, garante um fluxo de elétrons de forma a proteger a armadura da edificação, ao instalá-lo, a carbonatação deixa de ser uma preocupação porque a corrosão já está sendo impedida pela proteção catódica, um exemplo icônico dessa questão é a Ponte Rio-Niterói, ela detém de um sistema de proteção catódica por corrente impressa, apesar de estar situada entre dois grandes centros urbanos e ser atravessada por milhares de veículos à combustão por dia, a carbonatação não gera danos à estrutura;
- Aplicação de revestimentos sobre o concreto: A carbonatação age sobre a superfície do concreto, logo, ao proteger a superfície, o gás carbônico atmosférico não conseguirá penetrar na peça e reduzir o pH. O revestimento pode se dar com o uso de tintas, vernizes e outros materiais que isolem o concreto armado do meio atmosférico.

Apesar do seu impacto na redução do pH, o que leva ao efeito danoso já abordado anteriormente, a carbonatação também apresenta dois aspectos positivos que valem ser considerados.

- Redução da permeabilidade: Devido à precipitação do carbonato de cálcio, produto da reação entre o dióxido de carbono e a cal, ocorre a redução da porosidade do concreto devido à deposição desse sal nos poros, assim, impactando tornando o concreto menos permeável (NGALA e PAGE, 1997);
- Captação do gás carbônico disperso no ar: Apesar da retenção de dióxido de carbono ser prejudicial ao concreto armado, esse fenômeno reduz a concentração de gás carbônico na atmosfera, o que contribui para a melhoria na qualidade do

ar, especialmente no meio urbano, segundo JOHN (em sua entrevista à revista “Concreto & Construções”, edição julho-setembro de 2019), a meta deve ser desenvolver e projetar edificações duráveis as quais absorvam ao máximo CO₂.

CAPÍTULO 6 – REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA)

“Tem-se hoje relatado no meio técnico mais de 140 casos de barragens afetadas pela RAA” (HASPARYK, 2005).

6.1 *Histórico e Definições*

Nas décadas de 1960 e 1970, três barragens nordestinas foram diagnosticadas como vítimas da reação álcali-agregado, sendo elas: Peti (MG); Moxotó (AL) e Pedras (CE), foi justamente nesse período em que a primeira publicação brasileira relativa ao tema foi feita, em 1963, pelos pesquisadores GITAHY e RUIZ quando estudavam os agregados que seriam usados na construção da Barragem de Jupιά, localizada em Três Lagoas/MS. Nas décadas seguintes, a comunidade acadêmica buscou aprofundar o conhecimento quanto a esse fenômeno a fim de descobrir formas mais eficientes de proteger as estruturas dessa manifestação patológica. Conceitualmente, HASPARYK (2005) define a reação álcali-agregado como uma reação química que ocorre internamente em estruturas de concreto, envolvendo hidróxidos alcalinos do cimento e minerais reativos presentes no agregado, essa reação resulta em produtos os quais podem expandir e causar fissurações na presença de umidade.

O concreto é uma estrutura complexa repleta de elementos químicos em sua constituição, dentre eles, tem-se os íons potássio (K^+ , o qual é mais abundante) e os íons sódio (Na^+ , o qual é menos abundante) provenientes do clínquer Portland, ambos pertencentes ao grupo 1A da tabela periódica, isto é, família dos metais alcalinos (MEHTA e MONTEIRO, 2014). A Figura 18 trata-se de uma sapata de concreto que sofreu RAA.

Figura 18: Fatores condicionantes do RAA deletéria.



Fonte: SALLES et al. (2003).

6.2 Tipos de RAA e fatores contribuintes

A NBR 15577-1:2018 destaca dois tipos principais de RAA: a reação álcali-sílica (RAS) e a reação álcali-carbonato (RAC), essa norma brasileira define cada reação da seguinte forma:

- **Reação Álcali-Sílica (RAS):** Reação entre hidróxidos alcalinos, provenientes do cimento Portland ou outras fontes com certas rochas silicosas ou minerais silicosos, como opalas, cherts, quartzo microcristalino, quartzo deformado, vidro vulcânico, vidros reciclados, e outras, presentes em alguns agregados, que gera, com o produto da reação, gel álcali-sílica, que pode causar expansão anormal e fissuração do concreto em serviço (NBR 15577-1:2018).
- **Reação Álcali-Carbonato (RAC):** Reação entre hidróxidos alcalinos, provenientes do cimento Portland ou outras fontes, e certos agregados calcários dolomíticos argilosos, acompanhada de desdolomitização que, sob certas condições, pode causar a expansão deletéria do concreto ou argamassa (NBR 15577-1:2018).

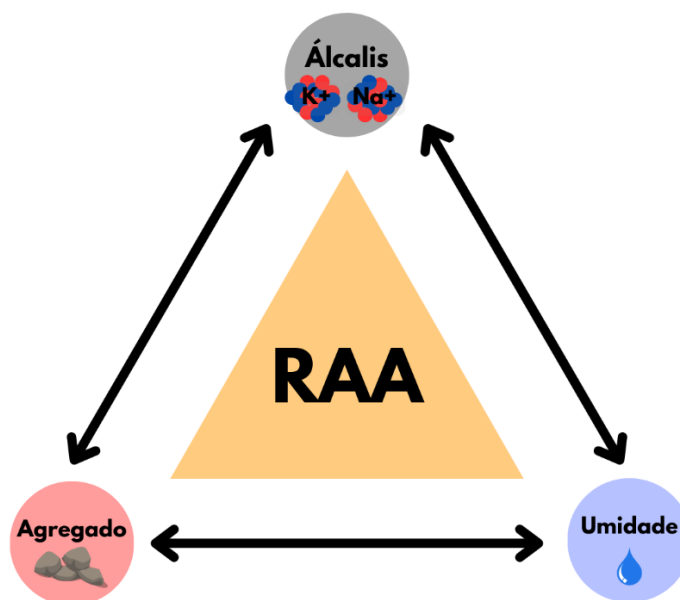
Além dos dois tipos apresentados pela norma, RIBEIRO (2021) destaca um terceiro tipo de RAA, que ocorre em condições específica e se dá de forma mais complexa.

- Reação Álcali-Silicato: Trata-se um fenômeno mais complexo e restrito a alguns tipos específicos de silicatos (presentes, por exemplo, nos feldspatos, folhetos argilosos, rochas magmáticas e outros), embora semelhante à RAS, ocorre de forma mais lenta pois os minerais reativos estão mais disseminados na matriz (RIBEIRO, 2021).

Os três tipos de reação são extremamente danosos às estruturas de concreto pois podem gerar a fissuração generalizada da peça, ela é causada pelos produtos da reação, os quais se expandem na presença de água, assim, gerando tensões internas que comprometem a integridade do concreto, esse fenômeno é comumente acompanhado de exsudações e eflorescências na superfície das tais, tal fissuração impacta diretamente o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto, além de facilitar a entrada de agentes deletérios na estrutura, algo que acelera consideravelmente o processo de deterioração da estrutura (RIBEIRO, 2021). Vale destacar que, apesar das principais causas da instalação da RAA serem a presença de minerais reativos, no agregado, que reagem com os álcalis do cimento, a umidade e a temperatura são fatores preponderantes para o desenvolvimento desta reação, de acordo com VALDUGA (2002), a temperatura atua como um catalisador da RAA, enquanto a umidade, conforme afirmado por FIGUEIRÔA e ANDRADE (2007), é fundamental para a ocorrência da reação.

Assim, COUTO (2008) define que a reação demanda a associação desses três fatores: agregados reativos, alta concentração de hidróxidos alcalinos nos poros e elevada umidade (entre 80 e 85%), ele representou tais fatores no seguinte esquema (Figura 19).

Figura 19: Fatores condicionantes do RAA deletéria.



Fonte: Adaptado de COUTO (2008).

De acordo com o modelo proposto por PREZZI, MONTEIRO e SPOSITO (1997), os aumentos volumétricos causados pelo inchamento do gel são atribuídos às forças de repulsão da dupla camada elétrica, eles dividiram o modelo em quatro etapas, são elas;

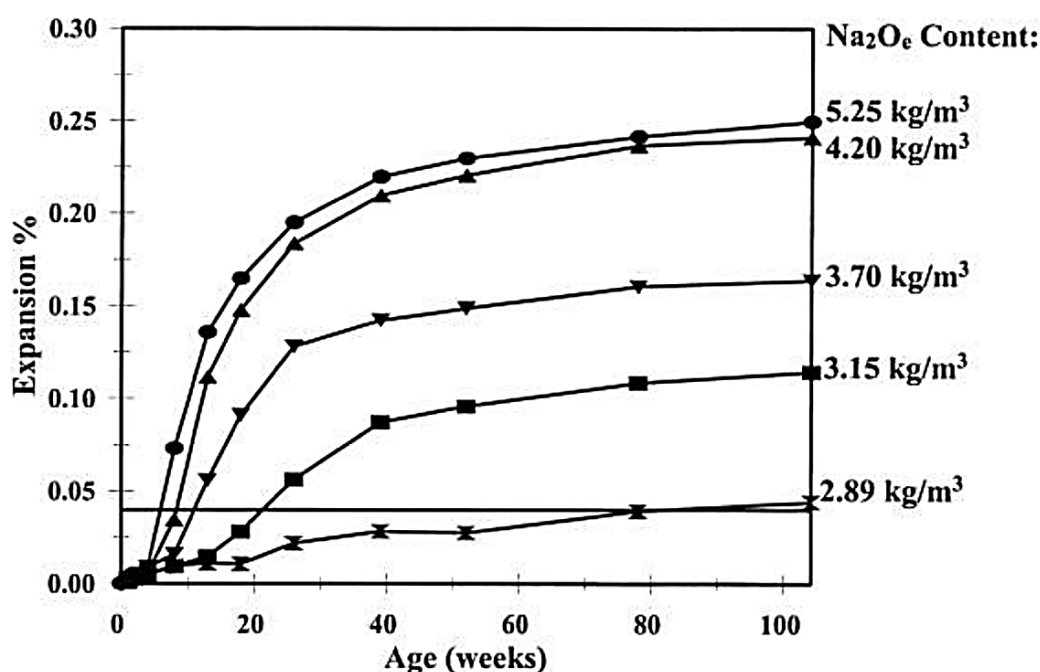
1. O campo elétrico criado pela partícula, o qual surge por meio do excesso localizado de cátions e a deficiência de ânions, os tais se combinam para criar uma força elétrica que interfere diretamente na espessura dessa dupla camada elétrica formada na superfície da sílica;
2. Sendo a área de interface diretamente proporcional à quantidade de água absorvida e, conseqüentemente, gerando maiores forças de repulsão e elevadas expansões;
3. A espessura da dupla camada e as forças de repulsão se desenvolverão levando também ao aumento das expansões internas;
4. Com a perpetuação dessas condições, surge um gel rico em sódio com elevada capacidade expansiva, superior a um gel rico em cálcio.

A depender de certos fatores, a RAA pode ser acelerada e intensificada, como o teor de álcalis do cimento e do concreto; grau de reatividade e consumo de água por m^3 de concreto; o teor de ar incorporado e as condições ambientais.

Quanto ao teor de álcalis do cimento e do concreto, a NBR 15577-1:2018 traz algumas medidas de mitigação da expansão, dentre elas, a normativa estabelece um valor máximo de $2,4 \text{ kg de Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/m^3$ para o teor de álcalis do concreto, tal valor vai ao encontro dos

resultados obtidos por MEHTA e MONTEIRO (2014) que, em estudos realizados na Inglaterra e na Alemanha, demonstraram que, caso o teor total de álcalis do concreto seja inferior a 3 kg/m³, não ocorrerá a expansão deletéria. Contudo, em um estudo pautado em desempenho no que tange às expansões, SHEHATA e THOMAS (2000) produziram corpos de prova prismáticos de 5 concretos, cada um com teor diferente de álcalis (5,25; 4,20; 3,70; 3,15 e 2,89 kg/m³), em todos havia calcário silicoso reativo como agregado gráudo e areia natural não-reativa, após dois anos, realizaram os ensaios de expansão. Os autores verificaram que a expansão de todas as cinco misturas de concreto excedeu 0,04% após dois anos, conforme apresentado na Figura 20, mas é nítido que a taxa de expansão e o valor final da expansão estão intimamente ligados ao teor de álcalis do concreto.

Figura 20: Impacto do teor de álcalis na expansão de corpos de prova prismáticos de concreto ao longo do tempo.



Fonte: SHEHATA e THOMAS (2000).

6.3 Medidas de prevenção

Sendo a reação álcali-silica a mais comum dentre as RAA, a NBR 15577-1 prescreve alguns ensaios a serem feitos de forma preliminar a fim de prevenir o aparecimento da manifestação patológica, são eles:

- **Análise Petrográfica dos Agregados Graúdos:** Essa análise é regida pela NBR 15577-3:2018 e consiste em examinar as características petrográficas (características químicas, estruturais e mineralógicas) dos agregados graúdos, tanto macroscopicamente (tipo, índice de forma, coerência e outros) quanto microscopicamente (microfissuração, composição mineralógica e afins), por fim, classificando o agregado como “potencialmente inócuo” ou “potencialmente reativo”;
- **Análise Mineralógica dos Agregados Miúdos:** Tal análise é realizada conforme a NBR 7389-1:2009, ela corresponde em examinar as características mineralógicas dos agregados, incluindo a identificação de minerais e sua distribuição granulométrica;
- **Método da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado:** O método da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado é um ensaio que simula as condições de exposição da argamassa à RAA, é realizado conforme a NBR 15577-4:2018, vale ressaltar que as barras de argamassa estão submetidas a condições de temperatura e umidade controladas e favoráveis à reação a fim de acelerar os resultados;
- **Método de Expansão em Primas de Concreto pelo Método Acelerado:** Da mesma do ensaio anterior, esse ensaio também simula as condições de exposição à RAA, mas em primas de concreto, esse ensaio segue a NBR 15577-7:2018, os prismas também estão sujeitos a temperaturas e umidades controladas e favoráveis à reação.
- **Método de Expansão em Primas de Concreto pelo Método de Longa Duração:** Regido pela 15577-6:2018, esse ensaio se diferente do anterior por avaliar os corpos de prova sob um maior período a fim de examinar os efeitos a longo prazo.

Além dos ensaios, a norma também estabelece uma série de medidas de mitigação à RAS (Tabela 09), a utilização de cada medida dependerá do grau de intensidade da medida preventiva (Tabela 08) e da classe da estrutura (Tabela 07).

Tabela 07: Classificação da estrutura.

Classificação da estrutura	Consequências da RAS	Exemplos
Classe A	Consequências pequenas ou insignificantes do ponto de vista econômico, ambiental e ambiental.	Estruturas temporárias (menor que 5 anos de vida útil), elementos não estruturais no interior de edifícios, canteiros de obras.
Classe B	Consequências moderadas do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança apenas se ocorrer deterioração generalizada.	Calçadas, calhas, telhas, muros etc.
Classe C	Consequências significativas do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança mesmo se ocorrer pequena deterioração.	Pavimentos de concreto, elementos de fundação, tubos, postes, alvenarias de vedação, tubulões, barreiras de segurança, elementos pré-fabricados com altos custos de reposição, estradas de baixo volume de tráfego, dormentes etc.
Classe D	Consequências sérias e de gravidade do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança mesmo se ocorrer pequena deterioração.	Grandes pontes, estádios, hidrelétricas, estruturas de obras de arte, barragens, instalações nucleares, torres eólicas, instalações de tratamento de água, instalações de tratamento de resíduos, túneis, elementos estruturais de difícil inspeção ou reparo.
<p>NOTA: Os exemplos da Tabela são ilustrativos e não abrangem todos os tipos de estrutura ou elementos estruturais de concreto. Meios agressivos e manifestações patológicas de outra natureza podem contribuir para acelerar o processo deletério iniciado pela reação álcali-agregado.</p>		

Fonte: NBR 15577-1:2018.

Tabela 08: Grau de intensidade da medida preventiva.

Risco de recorrência	Classe de estrutura			
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Desprezível	MP 0	MP 0	MP 0	MP 0
Mínimo	MP 0	MP 0	MP 1	MP 2
Moderado	MP 0	MP 1	MP 2	MP 3
Alto	MP 0	MP 3	MP 4	MP 4
Muito Alto	MP 0	MP 4	MP 4	MP 4

Fonte: NBR 15577-1:2018.

Tabela 09: Medidas de mitigação da expansão devida a RAS.

Grau de intensidade da medida preventiva	Opção 1	Opção 2	Opção 3
MP 0	Nenhuma ação é necessária		
MP 1	Limitar teor de álcalis do concreto a valores menores que 2,4 kg/m ³ na Na ₂ O equivalente.	Utilizar cimentos: <ul style="list-style-type: none"> • CP II-E ou CP II-Z, conforme a NBR 11578, ou; • CP III, conforme a NBR 5735, ou; • CP IV, conforme a NBR 5736. 	Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de grau de intensidade 2.
MP 2	Utilizar cimento CP III com no mínimo 60% de escória, conforme NBR 5735.	Utilizar CP IV com no mínimo 30% de pozolana, conforme NBR 5736.	Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de grau de intensidade 3.
MP 3	Utilizar materiais inibidores comprovando a mitigação de reatividade potencial pelo ensaio acelerado.	Utilizar materiais inibidores, comprovando a mitigação de reatividade potencial pelo ensaio de primas de concreto aos dois anos.	Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de grau de intensidade 4.
MP 4	Utilizar materiais inibidores comprovando a mitigação de reatividade potencial pelo ensaio acelerado.	Utilizar materiais inibidores, comprovando a mitigação de reatividade potencial pelo ensaio de primas de concreto aos dois anos.	Trocar o agregado.

Fonte: NBR 15577-1:2018.

CAPÍTULO 7 – ATAQUE DO CONCRETO POR SULFATOS

“Aproximadamente 75% das publicações que tratavam da corrosão do concreto até 1975 se dedicavam à ação dos sulfatos.” (CÁNOVAS, 1988).

7.1 Definição e Tipos de ataque

Os íons sulfatos tem um grande potencial danoso ao concreto armado, segundo RIBEIRO (2021), esse dano tem uma natureza muito mais mecânica do que eletroquímica, visto que os sulfatos formam cristais de sulfoaluminatos de cálcio e sulfatos de cálcio, ambos com considerável capacidade expansiva, segundo HELENE, TUTIKIAN e BOLINA (2019), podendo apresentar um aumento de até 2,5 vezes o volume do aluminato, capacidade essa que faz surgir tensões internas de tração que podem levar à fissuração do concreto.

O American Concrete Institute (ACI) considera que o ataque por sulfatos pode reconhecido pela formação da etringita tardia. De acordo com MEHTA e MONTEIRO (2014), ainda no estado fresco, há a formação da etringita primária durante a hidratação inicial do cimento, a qual se trata de um processo natural que não causa danos à estrutura pois o concreto ainda não está consideravelmente rígido, contudo, etringita tardia se dá quando o concreto já está no estado rígido, logo, o aparecimento desse composto gera as tensões internas comentadas anteriormente.

Com base em diferentes autores, o ataque por sulfatos é distribuído em quatro categorias, sendo elas:

1. Formação da etringita e da gipsita: Formação de etringita e gipsita devido à reação do aluminato tricálcico (C_3A) com sulfatos de cálcio ou sódio, no caso da etringita, ou com hidróxido de cálcio (portlandita) ou silicato de cálcio hidratado (a depender do cátion ligado ao íon sulfato), no caso da gipsita (SKALNY, MARCHAND e ODLER, 2002);
2. Cristalização dos sais: Tal cristalização ocorre por meio da penetração, seja por capilaridade, difusão ou permeabilidade, de sais de sulfato na base cimentícia, com o acúmulo desses sais e a posterior vaporização da água, pode ocasionar a cristalização dos sais resultando em um aumento volumétrico dentro da matriz do concreto (QUANBING, XUELI e SHIYUAH, 1997);

3. Formação da etringita tardia: Em caso de desbalanceamento entre os teores de aluminato tricálcico e de gipsita, estando o C_3A mais abundante, esse composto poderá gerar uma cadeia de reações as quais resultam na formação da etringita tardia, ou trissulfoaluminato hidratado (RIBEIRO, 2021). Além desse desbalanceamento, a cura é um outro fator impactante na formação de etringita tardia, isto é, quando o concreto é submetido a temperaturas superiores a $65\text{ }^\circ\text{C}$ (comum em concretagem usando concreto massa ou cura térmicas de peças pré-fabricadas), a reação de formação da etringita primária não ocorre, sendo postergada até uma redução da temperatura, contudo, quando se dá essa redução, o concreto já está dando sinais de rigidez, assim tendo que lidar com tensões internas acentuadas ainda em estado prematuro (HELENE, TUTIKIAN e BOLINA, 2019);
4. Formação da taumasita: Em cenário de ataque simultâneo com sulfatos e carbonatos, sob baixas temperaturas, pode ocorrer a formação de taumasita, diferentemente da etringita, a taumasita ataca o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), ao invés do aluminato tricálcico, esse efeito leva à degradação do concreto, mas sem a ocorrência de efeitos expansivos. Para a formação da taumasita, além de sulfatos e carbonatos, deve haver a presença de cálcio e de dióxido de carbono (CRAMMOND, 2003).

Segundo SOUZA (2006), no que diz respeito às reações formadoras da etringita e da gipsita, a deterioração do concreto gerada devido ao ataque por sulfatos ocorre seguindo três passos.

- 1º passo: Em função da permeabilidade do concreto, ocorre a difusão de íons sulfato agressivos ao longo da matriz cimentícia;
- 2º passo: Esses íons sulfatos agressivos reagem com determinados constituintes do concreto, assim, podendo gerar etringita ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$) ou gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), os quais fazem surgir tensões internas resultantes de sua expansão volumétrica;
- 3º passo: Fissuração do concreto devido às tensões internas de tração podendo ainda estar associada à descalcificação do C-S-H, o que impacta diretamente na resistência do material.

A Tabela 10 demonstra o volume molecular dos produtos gerados durante o ataque por sulfatos.

Tabela 10: Volume molecular dos produtos gerados durante o ataque por sulfatos.

Composto	Volume molecular (cm ³ /mol)
Ca(OH) ₂ – Hidróxido de cálcio	33,2
CaSO ₄ .2H ₂ O – Gipsita	74,2
3CaO.Al ₂ O ₃ .6H ₂ O – Aluminato	150,0
3CaO.Al ₂ O ₃ .3CaSO ₄ .31H ₂ O – Etringita	715,0

Fonte: RIBEIRO (2021).

Através da tabela acima, é notório o aumento volumétrico resultante das reações com sulfatos, a gipsita (produto da reação que consome o hidróxido de cálcio) tem cerca do dobro de volume do hidróxido de cálcio e a etringita (produto da reação que consome o aluminato de tricálcio) possui quase sete vezes o volume do aluminato tricálcio.

7.2 Agentes contribuintes de íons sulfatos

Segundo RIBEIRO (2021), existem quatro principais agentes contribuintes de íons sulfato para o concreto no ambiente, são eles:

1. Água: Por meio de ciclos de molhagem e secagem, a água pode introduzir sais de sulfatos no interior do concreto, os quais farão um processo de cristalização (categoria 2), um outro cenário seria o fato da própria água estar sulfatada o que promoveria reações químicas deletérias ao concreto (categoria 1 ou 3), as quais já foram discutidas anteriormente (RIBEIRO, 2021);
2. Solos: Os solos agressivos são extremamente danosos, especialmente para as estruturas de fundação, a coloração do solo pode ser um forte indício da presença ou não de componentes agressivos, solos com coloração cinza a negra, em particular quando apresentarem manchas de ferrugem, são considerados suspeitos (RIBEIRO, 2021);
3. Agregados: Diversos agregados podem conter agentes químicos danosos ao concreto, como o sulfeto de ferro (FeS₂), que produz ácido sulfúrico ao sofrer oxidação e outras reações expansivas no concreto, logo, é fundamental evitar o uso de agregados que contenham o sulfeto de ferro em sua composição, e.g., a pirita, a pirrotita, a marcassita e a calcopirita (HASPARYK et al., 2002);
4. Águas residuárias: Além da água de forma geral, as águas residuárias (esgoto sanitário, descarte industriais e afins) se destacam por possuírem um teor

altíssimo de íons sulfato, podendo variar de 12 (em resíduos industriais) à 50 miligramas (em esgoto sanitário) por litro de água, tais concentrações podem levar a um desgaste acelerado do concreto, bem como a possibilidade de contaminação do solo e de outros recursos hídricos (MOCKAITIS, 2008).

7.3 Medidas de prevenção e correção

A fim de prevenir ou minimizar as manifestações patológicas provocadas pelo ataque por sulfatos, algumas medidas podem ser tomadas, como:

- Uso de material pozolânico: O uso de pozolonas, como a sílica ativa, a escória de alto forno e as cinzas volantes, podem melhorar o desempenho do concreto diante de um ataque por sulfatos pois a reação pozolânica consome o hidróxido de cálcio, o que diminui a presença desse reagente, além disso, ao substituir uma parcela do cimento por material pozolânico, há uma redução na quantidade de aluminato tricálcico, outro composto que reage aos sulfatos, e o C-S-H produzido através da reação pozolânica possui menor relação cimento/sílica, fato esse que reduz a velocidade de penetração dos sulfatos (RIBEIRO, 2021);
- Redução da permeabilidade do concreto: A permeabilidade é um fator fundamental, visto que está diretamente vinculada à taxa e velocidade de penetração dos íons sulfatos, logo, é recomendado o uso de um concreto com baixa relação água/cimento e com baixa porosidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014);
- Aplicação de revestimento superficial: A baixa permeabilidade dificulta a difusão dos íons sulfato no interior da peça de concreto, o revestimento superficial serve como impeditivo para o ingresso desses agentes deletérios, o uso de uma película impermeável, sob forma de uma pintura ou de um hidrofugante serviria como forma de bloqueio (ASLAM, SRIVASTAVA e MINOCHA, 1987);
- Utilização de cimento Portland com resistência à sulfatos (CP RS): Diante de certos tipos de sulfatos (como o sulfato de sódio), o CP com resistência à sulfatos fornece uma maior resistência à estrutura diante dos ataques dessa natureza, visto que reduz o processo de expansão, mas vale dizer que essa categoria de cimento não apresenta esse ganho quando atacado por todos os tipos de sulfatos, e.g.,

verifica-se que redução no processo de expansão é insignificante quando atacado pelo sulfato de magnésio (SOUZA, MEDEIROS e FILHO, 2018).

CAPÍTULO 8 – ESTUDO DE CASO: REPARO E REFORÇO ESTRUTURAL DA PONTE DOS INGLESES

Após a apresentação dos principais aspectos que impactam a durabilidade das estruturas de concreto, das manifestações patológicas mais comuns — corrosão por cloretos, carbonatação, ataque por sulfatos e reação álcali-agregado — e das metodologias de ensaio e medidas de prevenção recomendadas pelas normas vigentes, é extremamente propício ilustrar, na prática, a aplicação desses conceitos em um caso real. O reparo, ou recuperação, e o reforço estrutural da Ponte dos Ingleses, em Fortaleza/CE, será apresentado como estudo de caso pois essa obra possibilita compreender como o diagnóstico patológico, a caracterização dos danos por meio de ensaios de campo e laboratório e a seleção de técnicas e materiais corroboram para garantir a durabilidade e a segurança de estruturas à despeito de condições ambientais severas. A seguir, será detalhado o histórico e a construção da estrutura; as manifestações patológicas identificadas; os ensaios realizados e as medidas de correção e prevenção adotadas, demonstrando a relevância dos conceitos teóricos para o sucesso de intervenções em estruturas de concreto degradadas.

As informações a seguir foram extraídas da 15ª edição da Revista Estrutura, veiculada pela Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE) e publicada em outubro de 2024, no artigo redigido pelos engenheiros civis Hugo Mota e Joaquim Eduardo Mota (responsáveis pelo projeto executivo de recuperação e reforço), e fornecidas pelo consórcio executor dos serviços de recuperação e reforço da estrutura.

8.1 História e Concepção da obra

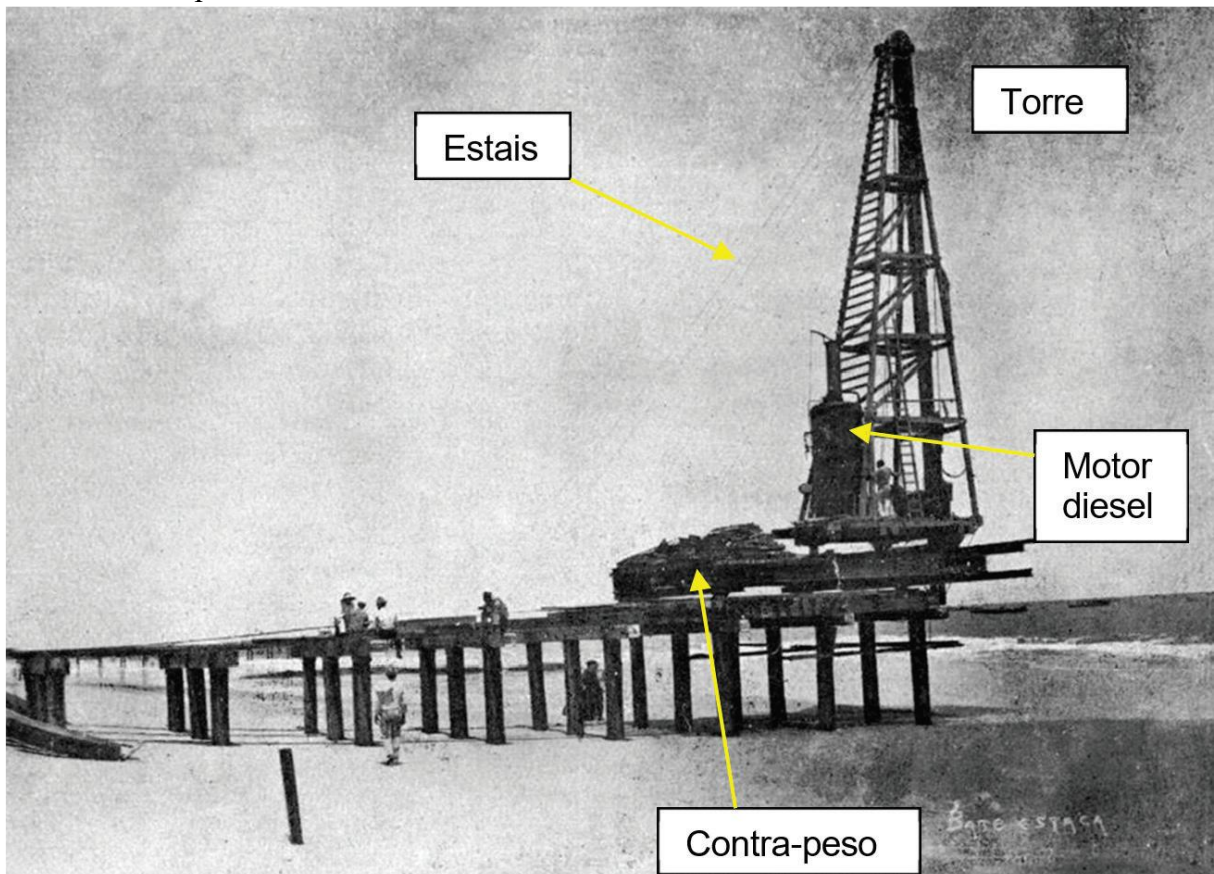
A Ponte dos Ingleses, a qual inicialmente foi batizada como Viaduto Lucas Bicalho (homenageando o engenheiro responsável por sua concepção), foi concebida no ano de 1920 e se estenderia por 800 metros mar adentro na praia de Iracema, em Fortaleza/CE. Construída pela firma inglesa Norton Griffiths (fato que a levou ser nomeada popularmente como “Ponte dos Ingleses”), sob a coordenação do engenheiro George Ivan Cope, reconhecido especialista em “cimento armado” da época, a estrutura original foi executada inteiramente em concreto armado, com estacas pré-moldadas octogonais maciças, pilares, vigamento e laje do tabuleiro. Por questões políticas e orçamentárias, a obra nunca foi concluída ou sequer utilizada como porto, mas fíndou se tornando ponto turístico emblemático da cidade de Fortaleza. As Figuras 21 e 22 se tratam de fotografias da época da construção.

Figura 21: Inserção da primeira estaca da Ponte dos Ingleses.



Fonte: Arquivo Nirez, 2021.

Figura 22: Torre do bate-estaca (tipo Cantitravel) fincando as estacas de fundação da ponte.



Fonte: Arquivo Nirez, 2021.

Em 1994, cinco anos após ter sido tombada pela Câmara Municipal de Fortaleza, ocorre uma reforma, onde o tabuleiro de concreto deteriorado foi substituído por uma plataforma de madeira, foram elaboradas novas vigas transversais e longitudinais para apoio dessa plataforma e os pilares foram encamisados. Em janeiro de 2018 ocorreu sua completa interdição, quando as ondas excepcionais (“uplift action”) destruíram quase totalmente a plataforma.

8.2 Identificação das manifestações patológicas e Ensaio realizados

Inicialmente, diversas inspeções in loco foram realizadas visando identificar as manifestações patológicas existentes e determinar o procedimento de reparo e reforço mais adequado à estrutura. Ao longo dessas inspeções, diversas manifestações patológicas foram registradas, muitas delas em estado crítico, ressaltando a urgência em executar os serviços pois a estrutura da ponte estava severamente comprometida. As Figuras 23 a 25 são fotografias que capturaram o precário estado de conservação da estrutura.

Figuras 23 a 25: Manifestações patológicas encontradas durante a inspeção técnica.





Fonte: Fotografado pelo Consórcio executor dos serviços, 2021.

Com a finalidade de caracterizar os materiais usados na estrutura e definir os critérios de projeto, foram feitos alguns ensaios in loco e em laboratório, a saber: determinação da resistência à compressão de testemunhos; determinação de frente de carbonatação; aferição de resistividade elétrico-volumétrica; determinação dos teores de sulfato e de cloreto em 20 amostras de pó de concreto, por fim, executou dois furos de sondagem à percussão (SPT) e uma prova de carga estática em uma estaca.

A partir dos testemunhos extraídos, os ensaios laboratoriais verificaram que a resistência do concreto original dos pilares alcançou 44 MPa, sugerindo uma qualidade excepcional do cimento importado em 1920. Contudo, não houve frente de carbonatação detectável pelo método colorimétrico (utilizado fenolftaleína), conforme apresentado na Figura 26, provavelmente devido ao preenchimento dos poros superficiais pela água de arrebentação. O teor de íons cloreto e de íons sulfato foi verificado através da extração de pó de concreto (Figura 27), a taxa de cloreto variou de 0,50% a 0,80%, muito acima do limite de 0,15%, e a taxa de sulfato situou-se entre 0,10% e 0,20%, dentro dos limites recomendados. Esses resultados, aliados à resistividade elétrico-volumétrica média de 47 $k\Omega \cdot cm$ (o limite de referência é de 20 $k\Omega \cdot cm$), apontam o ataque por cloreto como principal mecanismo de deterioração, classificando conforme a NBR 6118:2023. O ambiente possui classe de agressividade IV (respingos de maré).

Figura 26: Testemunhos após o ensaio de carbonatação.



Fonte: Fotografado pelo Consórcio executor dos serviços, 2021.

Figura 27: Perfuração com furadeira para análise do pó do concreto.



Fonte: Fotografado pelo Consórcio executor dos serviços, 2021.

Quanto à fundação, os dois furos de sondagem à percussão demonstraram uma boa capacidade resistente do solo, com camadas de areia fina e rocha alterada, além do SPT, foi feita uma prova de carga estática visando verificar o desempenho das estacas pré-moldadas octogonais, as quais apresentaram uma carga admissível de 3.000 kN e recalque de apenas 2,10 mm, as Figuras 28 e 29 demonstram a execução do teste.

Figuras 28 e 29: Prova de carga estática de estaca.



Fonte: Fotografado pelo Consórcio executor dos serviços, 2021.

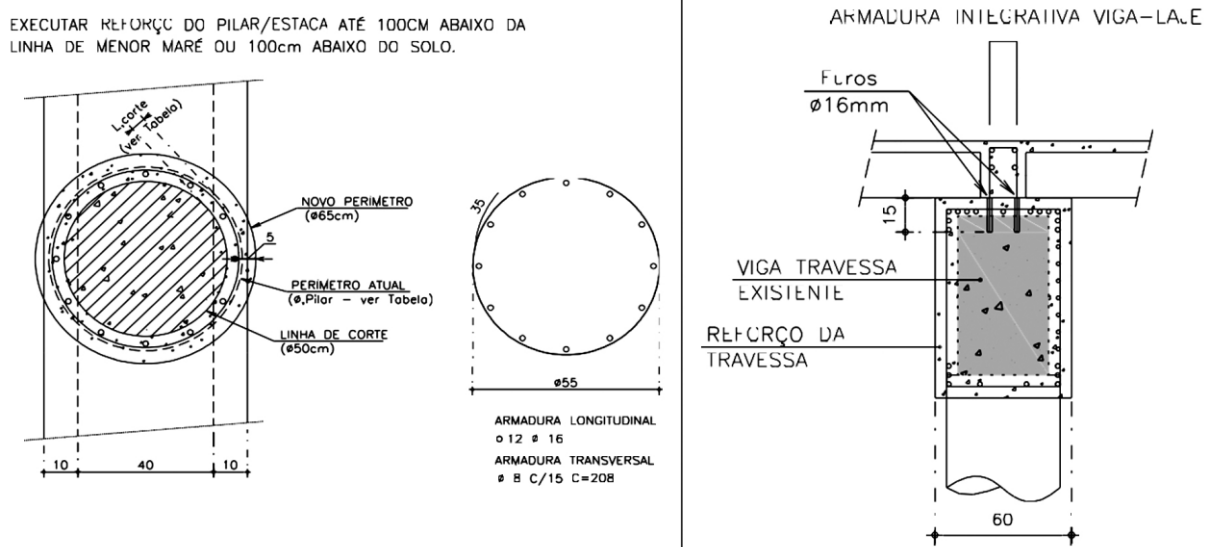
8.3 Projeto de recuperação e reforço estrutural

O projeto previa três pacotes de serviços (primeiro as ações de reparo; seguido pelo preparo e execução do reforço e as definições quanto ao concreto utilizado e aos cobrimentos) que deveriam ser seguidos a fim de garantir a efetividade e a durabilidade das intervenções, a saber:

- Ações de reparo: Essa etapa contempla os serviços pertinentes à recuperação da estrutura existente.
 - Corte e retirada do concreto desagregado;
 - Exposição das armaduras corroídas até atingir a área sã, em caso de armadura rompida ou com mais de 30% da seção comprometida, será feita a recomposição;
 - Limpeza de armaduras com hidrojateamento complementada com escova de aço;
 - Aplicação de inibidor de corrosão sobre as armaduras.
- Preparo e execução do reforço: O reforço tem o objetivo de aprimorar a capacidade resistente da estrutura de maneira que atenda ao novo carregamento de forma durável:
 - Escarificação de toda área do elemento estrutural com retirada de 10 mm a partir da superfície a fim de expor o agregado;
 - Hidrojateamento para limpeza da superfície;
 - Instalação das formas e armaduras complementares;
 - Instalação de ânodos de sacrifício (proteção catódica);
 - Aplicação de adesivo estrutural, visando garantir a aderência entre o concreto novo e o concreto antigo;
 - Concretagem de reforço.

Uma exigência de projeto importante foi a definição do comprimento de recuperação e reforço, isto é, até onde se estenderão os serviços, o projeto definiu que recuperação e o reforço deverão contemplar até um metro abaixo do nível da menor maré ou um metro abaixo do solo, essa medida tem a finalidade de proteger essa área crítica correspondente à variação de maré. A Figura 30 mostra detalhes do encamisamento e do reforço dos pilares e vigas travessas.

Figura 30: Detalhes do encamisamento e do reforço dos pilares e vigas travessas.



Fonte: HUGO A. MOTA C. ENGENHARIA DE PROJETOS, 2021.

- Concreto utilizado e cobrimentos: Por se tratar de uma região de alta agressividade, conforme já demonstrado, é importantíssimo a seleção de um concreto adequado às condições e a adoção de uma espessura de cobrimento que garanta maior durabilidade à estrutura, para tais, o projeto previu:
 - Concreto com resistência característica de 40 MPa;
 - Fator água-cimento menor ou igual a 0,45;
 - Cimento adotado será o CP V-ARI (com alta resistência inicial);
 - Uso de um aditivo (1% da massa de cimento, e.g., Xypex Admix) e uma adição mineral (10% da massa de cimento, e.g., microssílica ou metacaulim);
 - Cobrimentos com espessura de 50 mm nas armaduras passivas e 70 mm nas armaduras ativas;

De acordo com a NBR 6118:2023, o cobrimento mínimo para pilares e vigas de concreto armado, quando situados em um ambiente com classe de agressividade IV, é de 50 mm enquanto pilares e vigas de concreto protendido devem possuir 55 mm, no mínimo. A diferenciação se dá pois, como apontado pela própria norma, o concreto protendido tende a ter uma corrosão mais acelerada do que o simplesmente armado devido aos efeitos tensão interna gerada pelos cabos de protensão, diante disso, o projetista julgou mais sensato a utilização de uma espessura de 70 mm ao invés de 55 mm em tais peças.

8.4 Execução da recuperação e do reforço estrutural

Quanto aos serviços propriamente ditos, a primeira fase foi a montagem da acessibilidade, visando garantir a segurança dos colaboradores e possibilitar a mobilidade entre as diferentes áreas a serem recondiçionadas, a acessibilidade se deu através de andaimes tubulares; plataformas metálicas suspensas e linhas de vida, as Figuras 31 e 32 demonstram a acessibilidade montada de forma geral.

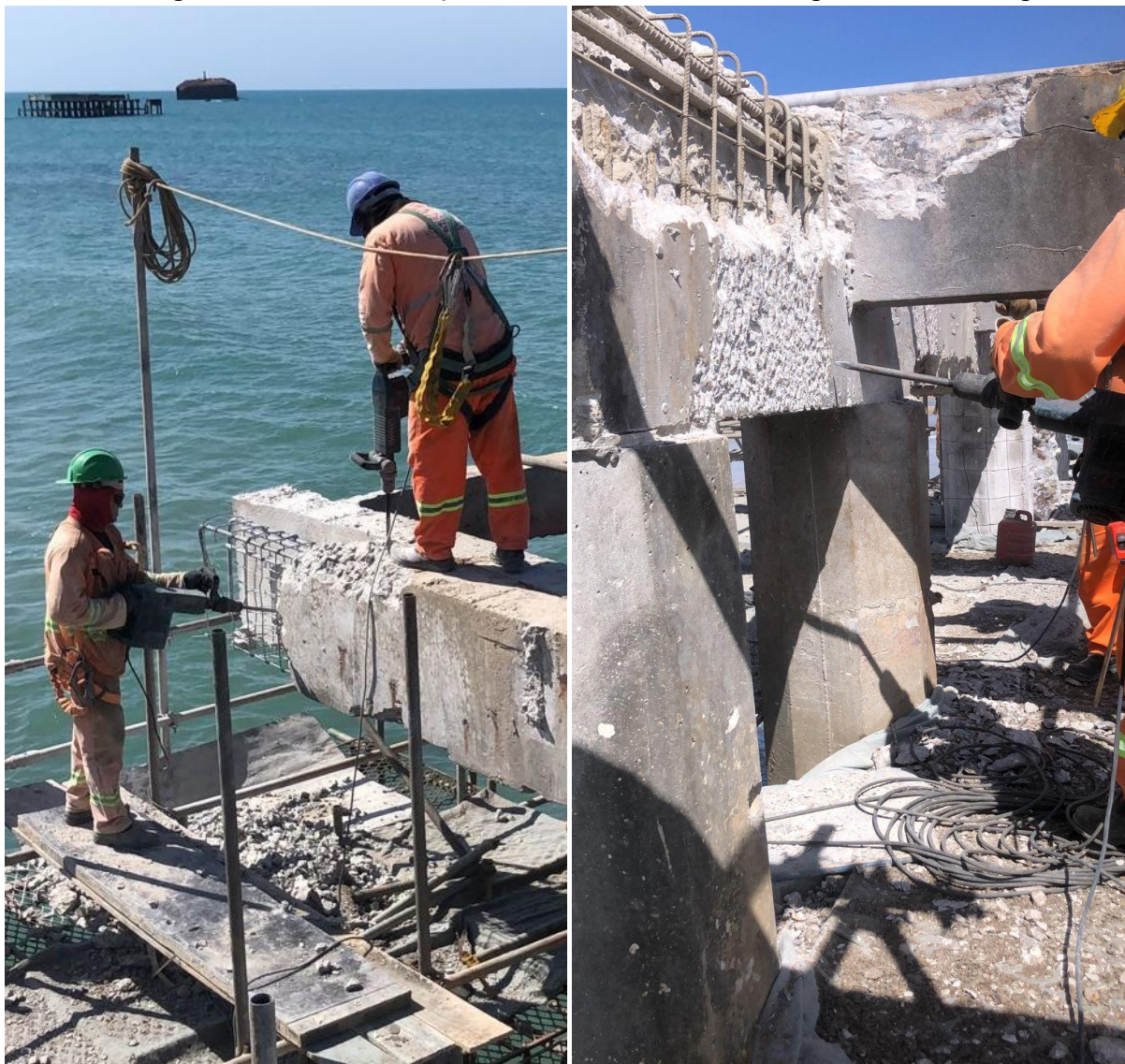
Figuras 31 e 32: Montagem da acessibilidade.



Fonte: Fotografado pelo Consórcio executor dos serviços, 2021.

Atendidas as devidas exigências com relação à acessibilidade, iniciou-se a demolição do concreto deteriorado e o apicoamento da superfície, as Figuras 33 e 34 demonstram a execução dessa etapa. A demolição visa retirar a camada de concreto comprometida e expor as armaduras, enquanto o apicoamento tem a finalidade de melhorar a aderência entre o concreto antigo e o concreto novo, assim, tornando o elemento monolítico.

Figuras 33 e 34: Demolição do concreto deteriorado e apicoamento da superfície.



Fonte: Fotografado pelo Consórcio executor dos serviços, 2021.

Com a remoção do concreto deteriorado, os serviços focaram no tratamento da armadura e na instalação do sistema de proteção catódica, a saber: hidrojetamento da superfície (Figura 35); recomposição das armaduras (Figura 36); aplicação do inibidor de corrosão (Figura

37) e instalação dos ânodos de sacrifício (Figura 38). Cada uma dessas etapas desempenha um papel importante na recuperação estrutural, esquematicamente:

- O hidrojateamento serve para limpar a superfície apicoada, retirando a poeira e os detritos presentes, com isso melhorando a adesividade e removendo interferências na interface entre o concreto velho e o concreto novo;
- A recomposição da armadura é executada mediante a verificação do estado da seção transversal, seguindo o que foi apresentado no Capítulo 4;
- A aplicação do inibidor de corrosão tem o propósito de revestir a armadura com uma camada protetora que isola o aço do ambiente corrosivo, esse material tem um impacto extremamente positivo no prolongamento da vida útil da estrutura. Quanto à especificação do inibidor utilizado, existem dois principais tipos: o inibidor a base de zinco e o inibidor a base cimentício. O inibidor a base zinco, com uma coloração avermelhada, é o mais comumente utilizado devido ao seu baixo custo e sua boa efetividade na prevenção, todavia reduz a adesividade entre o aço e o concreto e entre os concretos (por isso deve ser aplicado com bastante cuidado a fim de não ser aplicado no concreto ao redor da armadura), quanto ao inibidor a base cimentícia, ele é menos comum devido ao seu custo de aquisição mais elevado e apresenta uma boa efetividade no combate à corrosão, mas, diferente do anterior, não diminui a adesividade com o concreto novo pois é originado da mesma matéria-prima do concreto, esse foi justamente o tipo de inibidor empregado no estudo de caso;
- Os ânodos de sacrifício, assim como já mencionados no Capítulo 4, fornecem à estrutura um fluxo regular de elétrons, logo, induzindo a ocorrência de somente reações catódicas, o que evita o desgaste da estrutura. Na Ponte dos Ingleses foram utilizados ânodos de zinco devido à fácil instalação e a necessidade de manutenção mínima frente à proteção catódica com corrente impressa, onde é necessário um acompanhamento contínuo durante a operação do sistema.

Figura 35: Hidrojateamento para limpeza da superfície.



Fonte: Fotografado pelo Consórcio executor dos serviços, 2021.

Figura 36: Recomposição de armadura.



Fonte: Fotografado pelo Consórcio executor dos serviços, 2021.

Figura 37: Pintura protetora com inibidor de corrosão.



Fonte: Fotografado pelo Consórcio executor dos serviços, 2021.

Figura 38: Instalação dos ânodos de sacrifício (destacados em laranja).



Fonte: Fotografado pelo Consórcio executor dos serviços, 2021.

A última etapa dos serviços foi a concretagem dos elementos, respeitando os cobrimentos recomendados pelo projeto, para tal, a concretagem foi dividida em duas etapas: a primeira aplicando concreto projetado via seca, mostrado na Figura 39, e a segunda com o emprego de concreto autoadensável, demonstrado na Figura 40.

- O concreto projetado é um tipo de concreto que garante maior celeridade à obra, especialmente diante de grandes áreas. Existem dois métodos de projeção, via seca e via úmida, a diferença fundamental está no estágio em que a água é incorporada à mistura. No concreto projetado via úmida, o concreto é confeccionado em centrais dosadoras e chega à obra pronto para ser jateado, esse método garante maior controle da relação a/c e gera menor desperdício e poeira, por outro lado, exige equipamentos de projeção mais robustos e não alcança grandes distâncias, quanto ao concreto projeta via seca, os agregados e o cimento são conduzidos forçadamente pela mangueira por meio de ar comprimido e a água é incorporada somente no bico de projeção, esse segundo método demanda equipamentos mais simples e pode alcançar distâncias de até 60 metros, ao contrário do anterior, a projeção via seca gera muita poeira e o controle de água depende do jateador, visto que a incorporação dela é regulada pelo operador no bico. Na Ponte dos Ingleses foi utilizado o segundo método, via seca, motivado especialmente pela dificuldade de acesso aos elementos estruturais, assim, demandando equipamentos menores e um grande alcance.
- O concreto autoadensável um tipo que tem ganhado grande notoriedade na construção civil devido à propriedade que o nomeia, a não necessidade de adensamento, ou seja, a etapa de vibração é extinguida do processo de concretagem. O consórcio executante optou por usá-lo, apesar do seu custo mais oneroso, devido à maior celeridade que ele fornece ao processo de concretagem e às geometrias a serem feitas.

Quanto aos métodos de concretagem utilizados, o concreto projetado foi empregado nos reparos pontuais, garantindo velocidade e praticidade, mas ele não é adequado quando se deseja obter espessuras maiores ou peças com geometrias bem definidas, assim, usou-se o concreto autoadensável nesses casos em que a peça estava bem deteriorada.

Figura 39: Aplicação de concreto projetado via seca.



Fonte: Fotografado pelo Consórcio executor dos serviços, 2021.

Figura 40: Aplicação de concreto autoadensável.



Fonte: Fotografado pelo Consórcio executor dos serviços, 2021.

CAPÍTULO 9 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste trabalho, foi possível compreender a importância de se estudar as manifestações patológicas em estruturas de concreto, sobretudo diante do papel que elas exercem no comprometimento da durabilidade, segurança, funcionalidade e estética das edificações. Tais manifestações são resultado de uma série de mecanismos de degradação, internos e externos, que atuam de forma progressiva sobre os materiais constituintes do concreto e sobre seus elementos estruturais, tornando inevitável a adoção de estratégias de prevenção, diagnóstico e intervenção. A partir de uma revisão bibliográfica fundamentada em normas técnicas nacionais e internacionais, bem como em publicações acadêmicas e experiências profissionais, buscou-se apresentar os principais processos patológicos que afetam as estruturas de concreto armado, detalhando suas causas, seus mecanismos de desenvolvimento e suas formas de mitigação.

Inicialmente, abordaram-se os conceitos de durabilidade, vida útil e manutenção, que norteiam a gestão da integridade das estruturas ao longo do tempo. Destacou-se a importância do controle da permeabilidade como ferramenta preventiva, já que ela influencia diretamente na penetração de agentes agressivos, sendo os mecanismos de transporte — difusão, absorção capilar e permeação — responsáveis por viabilizar a entrada de substâncias deletérias no interior do concreto. Em seguida, analisaram-se de forma individual as principais manifestações patológicas. A corrosão das armaduras foi destacada por seu caráter recorrente e por seu impacto direto na resistência e estabilidade das estruturas. A corrosão induzida por cloretos e a carbonatação foram tratadas como os principais gatilhos para o início da corrosão, sendo apresentados os fatores que favorecem sua ocorrência, as reações envolvidas e os critérios normativos que limitam a presença de agentes agressivos.

Na sequência, foi discutida a reação álcali-agregado (RAA), fenômeno químico expansivo que compromete o concreto por meio da formação de gel, destacando-se seus tipos, fatores condicionantes, métodos de detecção e estratégias de mitigação, com ênfase para o uso de adições minerais e agregados não reativos. Também foi abordado o ataque por sulfatos, incluindo suas diferentes formas (ataque externo, interno, por etringita tardia, por taumasita e cristalização salina), cujas reações produzem compostos expansivos e desestabilizantes, capazes de comprometer a integridade do concreto em ambientes agressivos. Ao longo do trabalho, buscou-se não apenas descrever tecnicamente os processos patológicos, mas também associá-los a aspectos econômicos — como o aumento exponencial do custo de reparo ao longo do tempo, conforme propõe a Lei de Sitter — e ambientais, especialmente no que tange à

necessidade de reduzir intervenções corretivas por meio de medidas preventivas e escolhas mais sustentáveis de materiais e métodos construtivos.

A aplicação prática do conteúdo teórico foi possível a partir do estudo de caso da Ponte dos Ingleses, em Fortaleza/CE, uma estrutura centenária de valor histórico e cultural, submetida à recuperação e reforço estrutural após avançado estado de degradação. Foram apresentados os principais danos identificados, os ensaios laboratoriais e *in loco* realizados, as recomendações do projetista e os procedimentos executivos adotados. A análise do caso permitiu observar a ocorrência simultânea de diversas manifestações patológicas — entre elas, fissuração, corrosão, lixiviação e desagregação do concreto — e compreender como técnicas como o uso de concretos especiais, aplicação de inibidores de corrosão, aumento de seções estruturais e substituição de armaduras comprometidas são fundamentais para restaurar o desempenho da estrutura e prolongar sua vida útil.

Conclui-se, portanto, que o enfrentamento das manifestações patológicas exige não apenas o conhecimento técnico sobre seus mecanismos, mas também uma abordagem preventiva, integrada e multidisciplinar, desde o projeto até a manutenção. O domínio das causas e das soluções associadas à degradação das estruturas de concreto é indispensável para garantir a durabilidade e a segurança das edificações, bem como para promover o uso mais racional dos recursos materiais, econômicos e ambientais. Espera-se que este trabalho contribua para o entendimento e a valorização da patologia das construções como ferramenta essencial no exercício da engenharia civil.

REFERÊNCIAS

- AL-DULAIJAN, S. U. et al. **Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate**. Cement and Concrete Composites, v. 25, n. 4-5, p. 627-635, 2003.
- AL-NADDAF, M. **A new automatic method for continuous measurement of the capillary water absorption of building materials**. Construction and Building Materials, v. 160, p. 1-9, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181732319X>. Acesso em: 30 maio 2025.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 201R-08: Guide to Durable Concrete**. Farmington Hills, MI: ACI, 2008.
- ANDRADE, C.; SILVA, A. **Durabilidade e Corrosão de Estruturas de Concreto**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- ASLAM, M.; SRIVASTAVA, R. S.; MINOCHA, A. K. **Durability of Concrete in Sulphurous Atmosphere**. Indian Concrete Journal, p. 129-132, maio 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL. **Pontes e Estruturas: Recuperação da Ponte dos Ingleses**. Revista Estrutura, São Paulo, ano 7, n. 15, p. 41-47, out. 2024. Disponível em: www.abece.com.br. Acesso em: 5 maio 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7389-1: Agregados - Análise Petrográfica de Agregado para Concreto - Parte 1: Agregado Miúdo**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica**. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779: Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água por Capilaridade**. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10786: Concreto Endurecido – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade à Água**. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10787: Concreto Endurecido – Determinação da Penetração de Água Sob Pressão**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho**. Parte 01: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-1: Agregados – Reatividade Álcali-Agregado - Parte 1: Guia para Avaliação da Reatividade Potencial e Medidas Preventivas para Uso.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-2: Agregados – Reatividade Álcali-Agregado - Parte 2: Coleta, Preparação e Periodicidade de Ensaios de Amostras de Agregados para Concreto.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-3: Agregados – Reatividade Álcali-Agregado - Parte 3: Análise Petrográfica para Verificação da Potencialidade Reativa de Agregados em Presença de Álcalis do Concreto.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-4: Agregados – Reatividade Álcali-Agregado - Parte 4: Determinação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-5: Agregados – Reatividade Álcali-Agregado - Parte 5: Determinação da Mitigação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-6: Agregados – Reatividade Álcali-Agregado - Parte 6: Determinação da Expansão em Prismas de Concreto.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-7: Agregados – Reatividade Álcali-Agregado - Parte 7: Determinação da Expansão em Prismas de Concreto pelo Método Acelerado.** Rio de Janeiro, 2018.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C1585-13: Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.** West Conshohocken, PA, 2013.

BAROGHEL-BOUNY, V. **Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons - Méthodes, analyse, interprétations.** [S. l.]: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1994.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. **A durabilidade das armaduras e do concreto de cobertura.** Tradução Oswaldo Cascudo. In: OLLIVER, J. P., VICHOT, A. (eds.). **Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente.** CASCUDO, O.; CARASEK, H. (eds., Trad.). São Paulo: IBRACON, p. 255-326, cap. 9, 2014.

BASHEER, P. A. M.; BASHEER, L.; LONG, A. E. **Influence of coarse aggregate on the permeability of concrete.** Magazine of Concrete Research, v. 53, n. 4, p. 281-291, 2001.

BERTOLINI, L.; ELSNER, B.; PEDEFERRI, P.; POLDER, R. **Corrosion of steel in concrete: Prevention, diagnosis, repair.** [S. l.]: Wiley, 2004.

BIER, T. H. A. **Influence of Type of Cement and Curing on Carbonation Progress and Pore Structure of Hydrated Cement Pastes.** MRS Proceedings, v. 85, p. 307-316, 1986.

- BOHNI, H. **Corrosion in reinforced concrete**. In: _____ et al. (Eds.). *Corrosion and corrosion protection*. Berlin: Springer, 2005. p. 219-244.
- CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo: Pini, 1988.
- CARVALHO, C. H. **Boletim Técnico N° 1 – Porosidade dos concretos**. Aracaju: Instituto Federal do Sergipe, 2018.
- COSTA, F. et al. **Proteção e Reparo de Estruturas de Concreto: Métodos e Materiais**. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.
- COUTO, T. A. **Reação Álcali-Agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.
- CRAMMOND, N. J. **The thaumasite form of sulfate attack in the UK**. *Cement and Concrete Composites*, v. 25, n. 7-8, p. 809-817, 2003.
- DIÁRIO DO NORDESTE. **Ceará tem mais de 90 pontes federais em situação ruim ou crítica; veja onde**. *Diário do Nordeste*, Fortaleza, 27 dez. 2024. Ceará. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/ceara/ceara-tem-mais-de-90-pontes-federais-em-situacao-ruim-ou-critica-veja-onde-1.3598619>. Acesso em: 2 jan. 2025.
- EL PAÍS. **Parte de viaduto no Eixão Sul desaba no centro de Brasília**. *El País*, São Paulo, 8 fev. 2018. Política. Disponível em: https://brasil.elpais.com/brasil/2018/02/06/politica/1517926437_579911.html. Acesso em: 11 dez. 2024.
- FICK, A. Ueber Diffusion. *Annalen der Physik und Chemie*, v. 170, n. 1, p. 59-86, 1855.
- FIGUEIRÔA, J. P.; ANDRADE, T. **O ataque da reação álcali-agregado sobre as estruturas de concreto: A descoberta pioneira da ocorrência do problema em fundações de ponte e edifícios na Região Metropolitana do Recife**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2007.
- FORTES, L. R. **Corrosão na armadura do concreto armado e sua avaliação pela técnica do potencial de eletrodo**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1995.
- FRANÇA, C. B. de. **Avaliação de cloretos livres em concretos pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2011.
- FRANÇA, L. H. P. **Caracterização e modelagem numérica do comportamento não linear do concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras metálicas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

GUMMERSON, R. J.; HALL, C.; HOFF, W. D. **Water movement in porous building materials - II. Hydraulic suction and sorptivity of brick and other masonry materials.** Building and Environment, v. 15, n. 1, p. 39-46, 1980. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360132380900153>. Acesso em: 30 maio 2025.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela Reação Álcali-Agregado e caracterização avançada do gel exsudado.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HASPARYK, N. P. et al. **Contribuição ao estudo da influência de sulfetos presentes no agregado nas propriedades e durabilidade do concreto.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Belo Horizonte. Anais eletrônicos. Belo Horizonte: IBRACON, 2002.

HELENE, P. **Manutenção de estruturas de concreto: uma abordagem econômica.** In: SEMINÁRIO NACIONAL DE TECNOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 2001, São Paulo. São Paulo: ANTAC, 2001.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em Armaduras para Concreto Armado.** 3. reimpr. São Paulo: Pini; IPT, 1986.

HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F.; BOLINA, F. L. **Patologia de estruturas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. **Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation.** Cement and Concrete Research, v. 32, n. 12, p. 1923-1930, 2002.

HUGO A. MOTA C. ENGENHARIA DE PROJETOS. **Projeto de Recuperação e Reforço da Ponte do Ingleses.** [S. l.], 2021.

INSTALAÇÕES E ENGENHARIA DE CORROSÃO LTDA (IEC). **Sistemas de proteção catódica.** 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Personalidade entrevistada: Vanderley Moacyr John.** Revista Concreto & Construções, São Paulo, ano 95, p. 16-25, jul.-set. 2019. Disponível em: https://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/pdfs/revista95.pdf. Acesso em: 27 maio 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Dados meteorológicos da Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática de Tramandaí A843.** [S. l.]: INMET, 2017. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos> . Acesso em: 15 dez. 2024

KANTRO, D. L. **Influence of water-cement ratio on concrete permeability.** Journal of the American Concrete Institute, v. 78, n. 3, p. 176-183, 1981.

KOSMATKA, S. H.; PANARESE, W. C. **Design and Control of Concrete Mixtures.** 15. ed. Skokie, IL: Portland Cement Association, 2002.

LATIMER, W. M. **The oxidation states of the elements and their potentials in aqueous solutions**. 2. ed. Nova York: Prentice-Hall, 1952.

LIMA, R. C. de. **Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão em reparo de estruturas de concreto**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-06022025-111708/pt-br.php>. Acesso em: 01 abr. 2025.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014

MOCKAITIS, G. **Redução de sulfato em biorreator operado em batelada e batelada alimentada sequenciais contendo biomassa granulada com agitação mecânica e “draft-tube”**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola Politécnica de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

NACE INTERNATIONAL. **Standard Practice for Cathodic Protection of Reinforced Concrete**. Houston, TX: NACE International, 2012.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 5. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1995.

NGALA, V. T.; PAGE, C. L. **Effects of Carbonation on Pore Structure and Diffusional Properties of Hydrated Cement Pastes**. *Cement and Concrete Research*, v. 27, n. 7, p. 1163-1172, 1997.

O GLOBO. **Queda da ponte entre MA e TO completa um mês com impacto na economia e desaparecidos**. G1 MA, São Luís, 22 fev. 2025. Notícia. Disponível em: <https://g1.globo.com/ma/maranhao/noticia/2025/01/22/queda-da-ponte-entre-maranhao-e-tocantins-completa-um-mes-com-impacto-na-economia-e-desaparecidos.ghtml>. Acesso em: 6 mar. 2025.

O GLOBO. **Um mês depois, perícia sobre desabamento do Edifício Andrea, em Fortaleza, ainda não foi concluída**. G1 Ceará, Fortaleza, 15 nov. 2019. Notícia. Disponível em: <https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2019/11/15/um-mes-depois-pericia-sobre-desabamento-do-edificio-andrea-em-fortaleza-ainda-nao-foi-concluida.ghtml>. Acesso em: 4 dez. 2025.

O GLOBO. **Veja o que se sabe sobre desabamento de prédio no Grande Recife**. G1 PE, Recife, 8 jul. 2023. Notícia. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pe/pe/pe/noticia/2023/07/08/veja-o-que-se-sabe-sobre-desabamento-de-predio-no-grande-recife.ghtml>. Acesso em: 10 dez. 2024.

OLIVEIRA, M. M. de et al. **Análise de riscos na inspeção de ativos industriais**. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 19., 2018, São Paulo. Anais... São Paulo: ABRACO, 2018. p. ID 200. Disponível em: https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2018/INTERCORR2018_200.pdf. Acesso em: 07 jun. 2025.

PARROTT, L. J. **Some effects of cement and curing upon carbonation and reinforcement corrosion in concrete.** *Materials and Structures*, v. 29, n. 189, p. 164-173, 1996.

PORTELLA, C. S. A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos segundo a ABNT NBR 6118:2007 e expostos aos cloretos disseminados em névoa salina na Praia do Futuro, em Fortaleza–CE.** 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano.** 2010. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

POURBAIX, M. **Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions.** 2. ed. Houston: National Association of Corrosion Engineers, 1974.

POWERS, T. C. et al. **Permeability of Portland cement paste.** *Journal of the American Concrete Institute*, v. 51, p. 285-298, 1954.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA (Brasil); CONTROLADORIA-GERAL DA UNIÃO - CGU. **Portal da Transparência do Governo Federal: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes: banco de dados.** Brasília, DF. Disponível em: <https://portaldatransparencia.gov.br/orgaos/39252-departamento-nacional-de-infraestrutura-de-transportes>. Acesso em: 4 jan. 2025.

PREZZI, M.; MONTEIRO, P. J. M.; SPOSITO, G. **Alkali-silica reaction, Part 1: use of the double layer theory to explain the behaviour of reaction-product gels.** *ACI Materials Journal*, v. 94, n. 1, p. 10-17, 1997.

QUANBING, Y.; XUELI, W.; SHIYUAN, H. **Concrete deterioration due to physical attack by salt crystallization.** In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 10., 1997, Göteborg, Suécia. *Proceedings...* Göteborg: Chalmers University of Technology, 1997. v. 4.

REICHERT, T. A.; BALESTRA, C. E. T. **Análise da absorção de água por capilaridade em concreto utilizando modelo de raiz quadrada do tempo.** In: SEMINÁRIO DE EXTENSÃO E INOVAÇÃO, 9., 2019, Cornélio Procópio. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019. Disponível em: file:///C:/Users/am_me/Downloads/4327-16738-1-PB.pdf. Acesso em: 27 maio 2025.

RIBEIRO, D. V. **Influência da Adição da Lama Vermelha nas propriedades e na corrosibilidade do concreto armado.** 2010. 260 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2010.

RIBEIRO, G. C. **Avaliação da corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado através de ensaios eletroquímicos.** 2014. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/ISMS8ALHAQ/1/disserta_o_mestrado_gusta_vo.pdf. Acesso em: 15 jun. 2025.

RILEM. CPC-11.3: **Absorption of water by concrete by capillarity**. Materials and Structures, v. 25, n. 151, p. 420-425, 1994.

RIPPER, T.; SOUZA, V. C. M. de. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998.

SCRIVENER, K. L. **The microstructure of concrete**. In: SKALNY, J. (Ed.). Materials science of concrete. Columbus, OH: American Ceramic Society, 1989. p. 127-161.

SILVA, P. F. A. **Durabilidade das Estruturas de Concreto Aparente em Atmosfera Urbana**. São Paulo: Pini, 1995.

SILVA, B. C. L. DA; GACHET, L. A.; LINTZ, R. C. C. **Análise microscópica de concreto pigmentado com resíduos de borracha aplicado em piso intertravado**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, n. 4, 2020.

SITTER, W. R. **Costs for service life optimization**. The Law of Fives. In: INTERNATIONAL CEBRILEM WORKSHOP ON DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1984, Copenhagen. Proceedings. Copenhagen: CEBRILEM, 1984. p. 18-20.

SKALNY, J.; MARCHAND, J.; ODLER, I. **Sulfate Attack on Concrete**. 1. ed. Nova York: Spon Press, 2008.

SOUSA, R. et al. **Estratégias de Prevenção e Combate à Corrosão em Concreto**. Brasília, DF: Concreto & Cia, 2012.

SOUZA, D. J. de; MEDEIROS, M. H. F.; FILHO, J. H. **Avaliação do cimento Portland RS frente ao ataque por sulfato de sódio e magnésio: uma análise física e comparativa em argamassas**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 11, n. 5, p. 1053–1075, 2018.

SOUZA, R. B. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – método de ensaio acelerado**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. Londres: Thomas Telford, 1997.

TREADAWAY, K. Corrosion period. In: SCHIESSL, P. (Ed.). **Corrosion of steel in concrete**. New York: RILEM / Chapman and Hall, 1988. p. 56-69.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado: mapeamento de agregados reativos no estado de São Paulo**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), São Paulo, 2002.

VIDALON, D. **Torre Eiffel está enferrujada e precisa de reforma completa, apontam relatórios**. CNN Brasil, [S. l.], 20 fev. 2025. Disponível em:

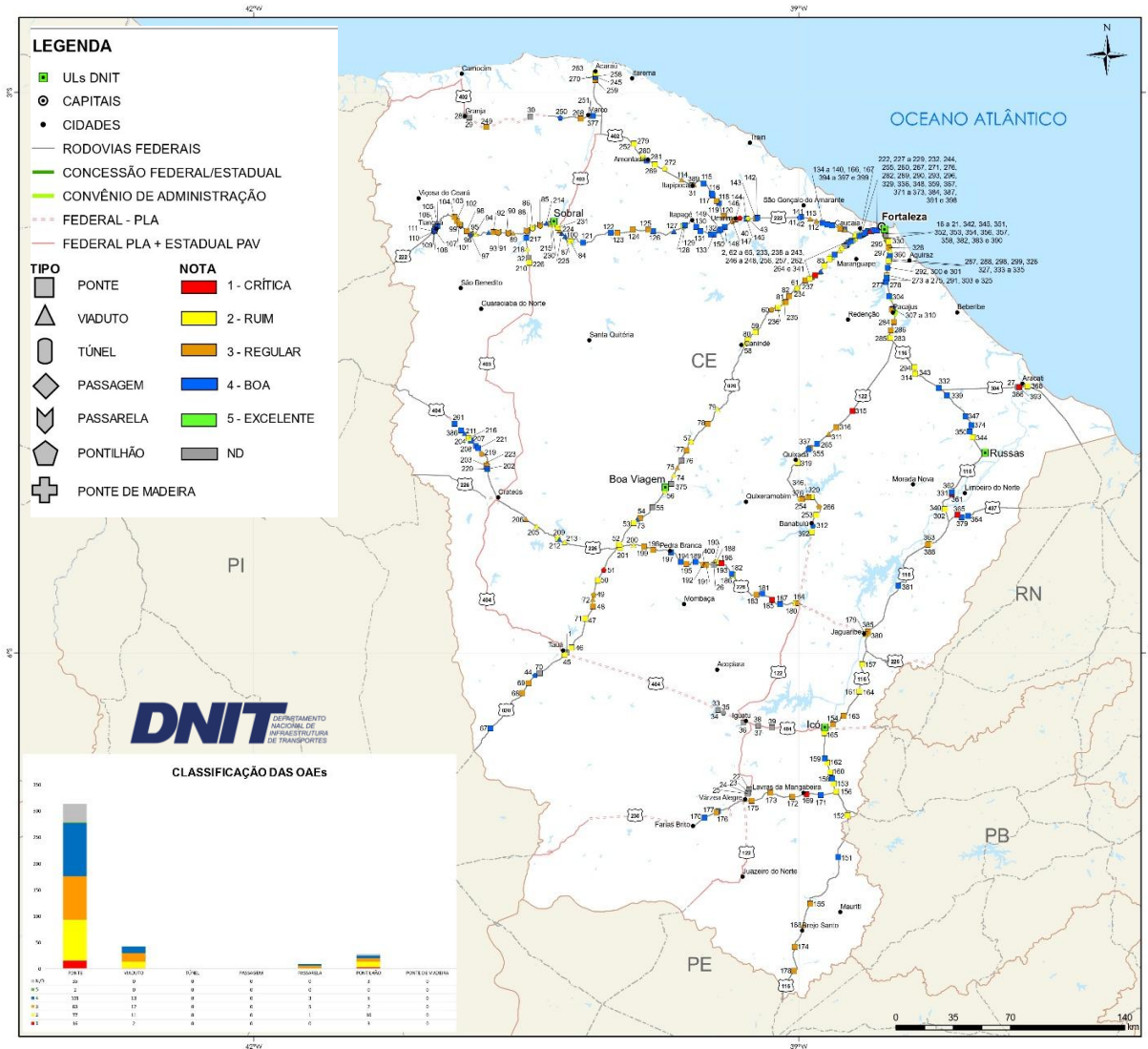
<https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/torre-eiffel-esta-enferrujada-e-precisa-de-reforma-completa-apontam-relatorios/> . Acesso em: 20 fev. 2025.

UNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRE D'ESSAIS ET MATERIAUX. CPC-18: **Measurement of hardened concrete carbonation depth.** (RILEM Recommendations CPC-18). Materials and Structures, [s. n.], p.453-455, 1988

WINSLOW, D. N.; DIAMOND, S. **Prediction of permeability of cement paste.** Journal of the American Ceramic Society, v. 53, n. 5, p. 254-257, 1970.

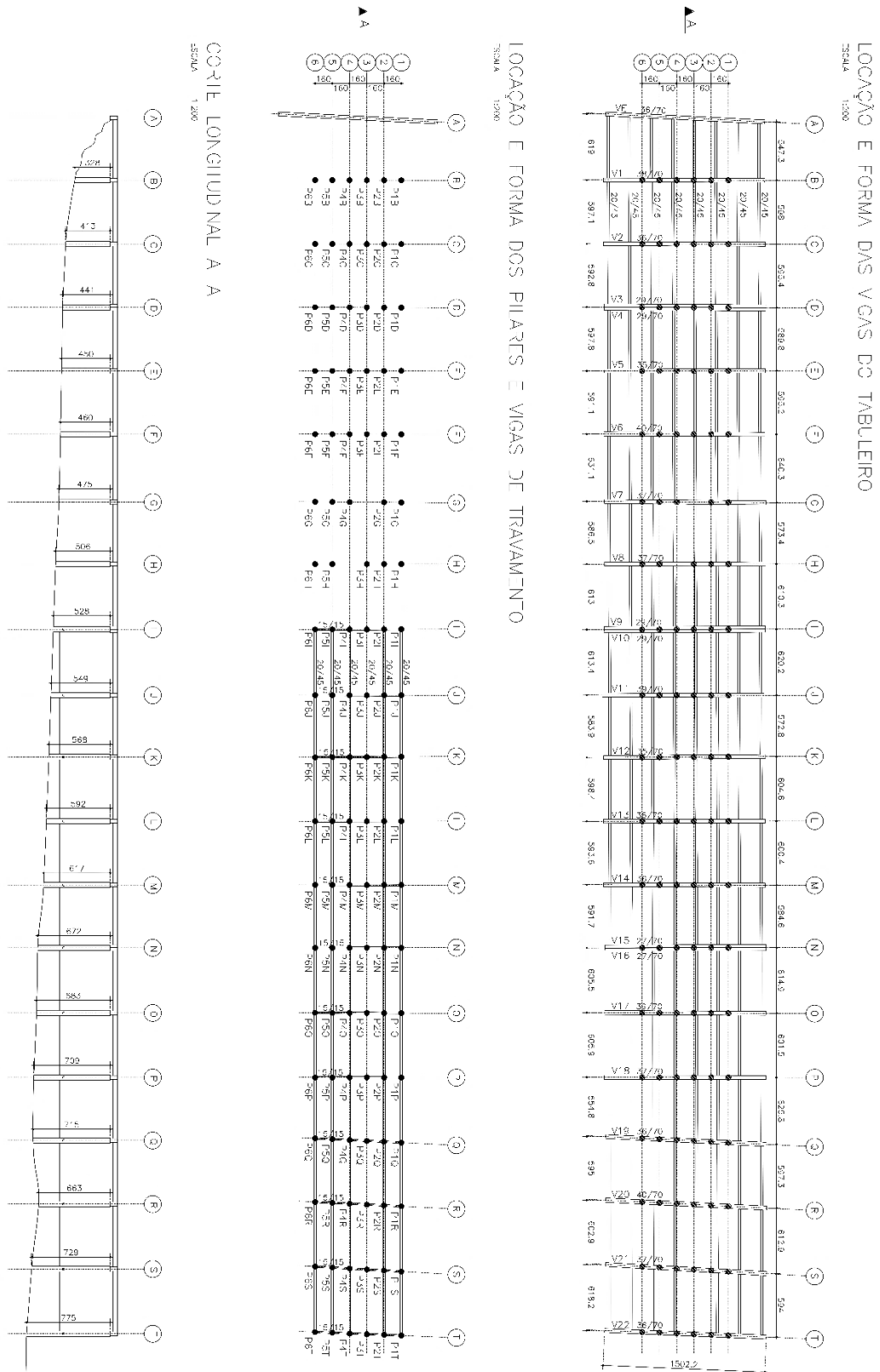
ZHANG, J.; WEI, S.; GUO, Z. **Influence of transition zone on concrete permeability.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 22, n. 10, p. 1051-1058, 2010.

ANEXO A – SITUAÇÃO DE CONSERVAÇÃO DAS OBRAS DE ARTE ESPECIAIS FEDERAIS NO ESTADO DO CEARÁ



Fonte: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), obtido através do link: https://www.gov.br/dnit/pt-br/rodovias/mapa-de-generciamento/mapas-de-obras-de-arte-especiais-marco-2023/074-9-mapa_ce_oae.pdf. Acessado em 10 de janeiro de 2025.

ANEXO B – PROJETOS DE RECUPERAÇÃO E REFORÇO ESTRUTURAL DA PONTE DOS INGLESES



Fonte: Fornecido pelo Consórcio executor dos serviços, 2021.

