



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ENGENHARIA DIAGNÓSTICA: ESTUDO DOS MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO E
A INTERVENÇÃO TERAPÊUTICA EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO -
ESTUDO DE CASO EM OBRA DE ARTE ESPECIAL**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Cabana Guterres

GABRIEL GARCIA

Uberlândia, Minas Gerais

Março de 2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL





GABRIEL GARCIA

**ENGENHARIA DIAGNÓSTICA: MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO E A
INTERVENÇÃO TERAPÊUTICA EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO -
ESTUDO DE CASO EM OBRA DE ARTE ESPECIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil – FECIV da
Universidade Federal de Uberlândia – UFU como
requisito para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Cabana Guterres.

Uberlândia, Minas Gerais

Março de 2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	12
RESUMO	13
1. INTRODUÇÃO	14
2. DOS OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	17
3. METODOLOGIA	17
3.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.2. ESTUDO DE CASO.....	18
3.3. ANÁLISE TÉCNICA E CRÍTICA.....	18
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES	19
4.1. O ESTUDO SISTEMATIZADO DA PATOLOGIA: DA ORIGEM À TERAPIA....	19
4.1.1. DESEMPENHO, VIDA ÚTIL E DURABILIDADE: UMA ANÁLISE DA ABNT NBR 15575-1:2013	20
4.1.2. TERMINOLOGIAS	21
4.2. CORROSÃO DE ARMADURAS	24
4.2.1. MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO: PROCESSO DE CARBONATAÇÃO 25	
4.2.2. MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO: ATAQUES DE CLORETO.....	26
4.2.3. PROCESSO DE CORROSÃO ELETROQUÍMICA.....	28
4.2.4. CONSIDERAÇÕES DO PROCESSO	30
4.3. ABERTURA DE FISSURAS E TRINCAS	30
4.3.1. ABERTURAS POR MOVIMENTAÇÃO TÉRMICA.....	32
4.3.2. ABERTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO E ALTAS TEMPERATURAS	34
4.3.3. ABERTURAS POR MOVIMENTOS HIGROSCÓPICOS	36
4.3.4. FISSURAS POR SOBRECARGA ESTRUTURAL	39
4.3.5. ABERTURAS POR RECALQUES DIFERENCIAIS DE FUNDAÇÕES	44
4.4. RETRAÇÃO E RAA	46
4.4.1. RETRAÇÃO DE ELEMENTOS CIMENTÍCIOS.....	46
4.4.2. REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA)	49
4.5. ÁGUA E A ESTRUTURA.....	50

4.5.1.	EFLORESCÊNCIAS E CRIPTOFLORESCÊNCIAS: AS MANIFESTAÇÕES DA LIXIVIAÇÃO	50
4.5.2.	SULFATOS E O CONCRETO	52
4.5.3.	BIODETERIORAÇÃO: ATAQUE BIOLÓGICOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO	53
4.6.	DESGASTE SUPERFICIAL.....	54
4.6.1.	EROSÃO E ABRASÃO DE CONCRETOS.....	55
4.6.2.	ATRITO E ABRASÃO EM CONCRETOS	55
4.6.3.	PERCUSSÃO EM CONCRETOS	56
4.7.	ALTERAÇÃO DE USO E FALHAS DE PROJETO/EXECUÇÃO.....	56
4.8.	INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS.....	59
4.8.1.	INSPEÇÕES DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS	60
4.8.2.	LAUDO TÉCNICO: INFORMAÇÕES E CRITÉRIOS	63
4.9.	ENSAIOS DE INVESTIGAÇÃO	65
4.9.1.	ENSAIOS PARA QUALIDADE E RESISTÊNCIA.....	65
4.9.2.	ENSAIOS PARA MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS QUÍMICAS.....	66
4.9.3.	ENSAIOS DE INSPEÇÃO E REPARO.....	66
4.10.	TERAPIA PARA AS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS	68
5.	ESTUDO DE CASO: VIADUTO DE UBERLÂNDIA – MG.....	71
5.1.	CONDIÇÕES DE TRÁFEGO	72
5.2.	ANÁLISE DAS PATOLOGIAS DO VIADUTO	73
5.2.1.	VIGAS LONGARINAS.....	73
5.2.2.	ANÁLISE, TRATAMENTO E INTERVENÇÃO	75
5.2.3.	MUROS DE ALA E ATERRO	77
5.2.4.	ANÁLISE, TRATAMENTO E INTERVENÇÃO	78
5.3.	PAVIMENTAÇÃO.....	79
5.3.1.	ANÁLISE, TRATAMENTO E INTERVENÇÃO	80
5.4.	GUARDA-CORPOS DE CONCRETO.....	80
5.4.1.	ANÁLISE, TRATAMENTO E INTERVENÇÃO	81
5.5.	ESTRUTURAS SEM PATOLOGIAS OBSERVADAS.....	82

5.6. CONCLUSÃO	82
REFERÊNCIAS	85
ANEXO A	89
ANEXO B	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema da Corrosão eletroquímica em uma barra (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)	29
Figura 2: Comparativo dimensional dos compostos gerados na corrosão (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)	29
Figura 3: Processo de corrosão de armaduras em edifício de Uberlândia - MG (Acervo Próprio, 2025)	30
Figura 4: Diagrama idealizado de tensão-deformação (ABNT, 2023).....	31
Figura 5: Comportamento de fissuras resultantes do abaulamento e dilatação de laje de cobertura (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)	34
Figura 6: Trinca devido a esforços de cisalhamento da dilatação de uma laje de cobertura - rompimento destacado na argamassa (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019).....	34
Figura 7: Destacamento de alvenaria com estrutura reticulada por movimentações térmicas distintas (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019).....	34
Figura 8: Destacamento da platibanda por movimentação térmico (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)	34
Figura 9: Abertura de fissuras na face oposta ao incêndio devido à microfissuração do composto e a pressão de fuga de água com 27 minutos de ensaio (DUAN <i>et al.</i> , 2023)	35
Figura 10: Fissuração e fuga de água da peça de concreto com 58 minutos de ensaio (DUAN <i>et al.</i> , 2023)	35
Figura 11: Concreto pós-incêndio fissurado com acúmulo de fuligem (SOLERO; SANTOS, 2015)	36
Figura 12: Formação típica de fissuras por EPU (THOMAZ, 2021).....	38
Figura 13: Formação de fissuras na estrutura por movimentos expansivos do painel (THOMAZ, 2021)	38
Figura 14: Fissuras por movimentação higroscópica em regiões de encontro pilar/alvenaria (THOMAZ, 2021)	38
Figura 15: Fissura na base da alvenaria por ascensão capilar da fundação (THOMAZ, 2021) ..	38
Figura 16: Fissuras por deficiência de armaduras negativas nas faces inferior (a) e superior (b) (RIPPER; SOUZA, 2009)	40
Figura 17: Fissuras de esmagamento de concreto por falta de espessura de laje (a) e fissuras por insuficiência de armadura de flexão positiva (b) (RIPPER; SOUZA, 2009).....	40
Figura 18: Fissuras geradas por momentos volventes em lajes nas faces superior (a) e inferior (b) (RIPPER; SOUZA, 2009)	40
Figura 19: Ramificação de fissuras por absorção de esforços da armadura de tração em vigas esbeltas (THOMAZ, 2021)	41

Figura 20: Fissuras típicas em vigas: ruptura do concreto por tração (a e b); esmagamento do concreto por esforço de compressão (c) e fissuras de cisalhamento na região dos apoios (d) (RIPPER; SOUZA, 2009)	42
Figura 21: Fissuras típicas de uma viga por esforços combinados de tração e cisalhamento (THOMAZ, 2021)	42
Figura 22: Fissuras de torção (RIPPER; SOUZA, 2009).....	42
Figura 23: Fissuras por ausência de estribos em pilares (THOMAZ, 2021).....	43
Figura 24: Fissuras por assentamento plástico do concreto em pilares (RIPPER; SOUZA, 2009)	44
Figura 25: Mecanismos de perda de aderência por assentamento plástico em barras de concreto armado (RIPPER; SOUZA, 2009)	44
Figura 26: Fissuras de retração em pilares de pórticos rígidos (THOMAZ, 2021).....	47
Figura 27: Padrão típico de fissuras por retração em vigas de concreto armado (RIPPER; SOUZA, 2009)	47
Figura 28: Fissuração por recalque em seção enfraquecida por furo (THOMAZ, 2021)	48
Figura 29: Modelo de fissuração típico de lajes por recalque (RIPPER; SOUZA, 2009)	48
Figura 30: Bloco de fundação com fissuras por RAA (GOMES e OLIVEIRA, 2009 <i>apud</i> THOMAZ, 2021)	50
Figura 31: Eflorescência por processo de lixiviação em parede fissura com mofo (Acervo Próprio, 2025)	51
Figura 32: Eflorescências em estrutura de concreto (3H Impermeabilização, 2020).....	51
Figura 33 (A e B): Desabamento da Ponte sobre a Represa do Rio Capivari (CENACID, 2005)	55
Figura 34: Exemplos de inconsistências em detalhamentos de armaduras. (a) incoerência na armação de encontros de elementos estruturais. (b) incoerência na armação de lajes em desnível	58
Figura 35: Extração de testemunho de concreto (LORENZI, 2019).....	67
Figura 36: Imagem de ensaio petrográfico (ÁVILA; THOMAS; DA SILVA, 2025)	67
Figura 37: Ensaios de Engenharia Diagnóstica (GP ENGENHARIA, 2022)	67
Figura 38: Vistas do viaduto: vista inclinada - a; via de acesso - b; pistas de rolamento - c; vigas longarinas – d (AUTOR).....	72
Figura 39: Abaulamento das pistas de rolamento na Rampa 7 devido a flechas excessivas das vigas longarinas (AUTOR)	73
Figura 40: Referenciais adotados para estudo do viaduto (AUTOR).....	74
Figura 41: Verificação de aberturas com auxílio de fissurômetro nas vigas longitudinais V2 e V6 (AUTOR)	75
Figura 42: Situação dos muros de ala e contenção do aterramento (AUTOR)	77

Figura 43: Aberturas no pavimento asfáltico nas regiões de conformidade das rampas (AUTOR)	79
Figura 44: Fissuras mapeadas nos guarda-corpos (AUTOR)	80
Figura 45: Aberturas presentes nos guarda-corpos (AUTOR)	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Critérios para o estabelecimento da VUP das partes do edifício (Adaptado)	21
Tabela 2: Relação a/c máxima e Classe de Concreto mínima para cada CAA	26
Tabela 3: Cobrimentos nominais normativos (em mm)	26
Tabela 4: Teores máximos de íons cloreto por condição de serviço	27
Tabela 5: Terapias para as manifestações patológicas em OAE	69
Tabela 6: Valores de projeto de inclinação e comprimento dos trechos do viaduto	72
Tabela 7: Grau de Abertura das fissuras no apoio do Bairro 1	74
Tabela 8: Grau de Abertura das fissuras no apoio do Bairro 2	74
Tabela 9: Nota de classificação das OAE segundo parâmetros estruturais por tipo de elemento (E.2)	90
Tabela 10: Nota de classificação das OAE segundo parâmetros estruturais (E.3)	91
Tabela 11: Nota de classificação das OAE segundo parâmetros estruturais por tipo de elemento (E.4)	92
Tabela 12: Nota de classificação das OAE segundo parâmetros estruturais por tipo de elemento (E.5)	93
Tabela 13: Nota de classificação das OAE segundo parâmetros funcionais (E.6)	94
Tabela 14: Nota de classificação das OAE segundo parâmetros de durabilidade por tipo de elemento (E.7)	95
Tabela 15: Nota de classificação das OAE segundo parâmetros de durabilidade por tipo de elemento (E.8)	96
Tabela 16: Nota de classificação das OAE segundo parâmetros de durabilidade por tipo de elemento (E.8)	96

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

α_i : coeficiente de dilatação térmica

$\Delta T = T_o - T_f$: Incremento de temperatura

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ART: Anotação de Responsabilidade Técnica

BIM: *Building Information Modeling*

CAA: Classe de Agressividade Ambiental

E: Módulo de Elasticidade (de Young)

ELS: Estado Limite de Serviço

ELU: Estado Limite Último

EPU: Expansão por Umidade

IP: Inspeção Predial

NB e NBR: Norma Brasileira

OAE: Obras de Arte Especiais

RAA: Reação Álcali-Agregado

RRT: Registro de Responsabilidade Técnica

VU: Vida Útil

VUP: Vida Útil de Projeto

ε : deformação resultante;

η : coeficiente de ponderação da rigidez do apoio

σ : tensão aplicada

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família. Assim como toda obra de engenharia, precisamos ter a nossa base, e, uma base forte nos garante confiança e capacidade de ir além. Por isso meu agradecimento mais especial tem que ser aos meus pais. À minha mãe Sandra Domingas de Souza por sempre estar presente nos meus momentos mais marcantes e etapas de vida, por ver os desafios que enfrentei e sempre me dar forças para continuar. Ao meu pai, Vitalino Garcia Oliveira, por ser uma figura de suporte que nunca mediu esforços para apoiar meus passos rumo à carreira que estou trilhando, por sempre defender e se orgulhar de mim, demonstrando uma orientação inabalável nesse período de aprendizado. A todos da minha família, tias, primos, primas e avós pelo apoio irrestrito e paciência com os desafios durante esses anos acadêmicos e, em destaque, à minha namorada Bianca Alves dos Santos, por ser meu porto seguro e por acreditar em mim mesmo nos momentos de incerteza. Agradeço ainda àqueles que sempre me deram forças, mas cumpriram com sua jornada antes de poder prestigiar este momento. Em nome de todos eles, dedico este trabalho à minha avó Lúcia Virgínia Garcia Oliveira.

Ao meu estimado orientador e professor Dr. Paulo Roberto Cabana Guterres, meus mais sinceros agradecimentos por me aceitar como seu orientando e me guiar nessa etapa final com uma maestria e auxílios que superaram expectativas. Desde nossas primeiras aulas, sempre admirei sua ética, carinho pelos alunos e didática impecável, que demonstram seu interesse e comprometimento não apenas na formação de profissionais técnicos, mas de cidadãos.

Aos meus amigos, agradeço por todo apoio demonstrado, pelas conversas, alegrias e oportunidades de crescimento que me proporcionaram. Dedico este trabalho aos meus grandes amigos e futuros colegas de profissão Giovanna Guimarães Veloso e Pedro Augusto Sousa Bessa por me auxiliarem inclusive nas pesquisas e levantamentos de campo que levaram à produção deste trabalho acadêmico e seus posteriores artigos. Agradeço ainda ao Engenheiro Marcelo Buiate, pelos conhecimentos práticos que me foram transmitidos e por compartilhar sua admiração por essa arte incrível que é a engenharia.

Finalmente, dedico este trabalho à instituição que me proporcionou todas as experiências e me levou a trilhar uma carreira profissional que se inicia já com excelentes expectativas: à Universidade Federal de Uberlândia (UFU), por toda a infraestrutura e corpo docente. Em especial, a todos da Faculdade de Engenharia Civil (FECIV). O empenho de toda a equipe para formar os melhores profissionais para o mercado de trabalho merece um destaque nestes agradecimentos.

RESUMO

A durabilidade em estruturas de concreto armado é um dos fatores determinantes para garantir o sucesso e o adequado desempenho do projeto. Embora seja uma discussão recente nas normativas brasileiras, o tema impacta diretamente a viabilidade econômica, segurança e impactos socioambientais de um empreendimento. Assim, este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta uma análise detalhada das principais manifestações de degradação de estruturas de concreto, com enfoque em Obras de Arte Especiais (OAE) por meio de um estudo de caso real de um viaduto no município de Uberlândia, Minas Gerais. A inspeção identificou manifestações patológicas críticas para uma obra com menos de 5 anos de inauguração, incluindo flechas excessivas, fissuras de cisalhamento em vigas longarinas e deterioração dos muros de ala. O diagnóstico apontou as causas principais como a má conformação da camada de pavimentação que gerou irregularidades superficiais no pavimento e possíveis falhas no detalhamento e/ou execução das armaduras transversais. Como propostas de intervenção, recomendou-se o uso de protensão externa para recuperação das flechas e fechamento das fissuras, adjunto a uma regularização do pavimento e revisão do projeto de drenagem da estrutura. Concluiu-se que a manutenção preventiva aliada a diagnósticos adequados feitos por profissionais especializados é essencial para garantir a Vida Útil de Projeto (VUP) e evitar situações de colapso estrutural.

Palavras-chave: Engenharia Diagnóstica. Patologia das Construções. Concreto Armado. Viaduto. Obras de Arte Especiais. Vida Útil de Projeto. Manifestações Patológicas.

1. INTRODUÇÃO

A durabilidade é um tema relativamente recente nas discussões técnicas e normativas da Engenharia Civil. Até o século passado, muito se baseava o dimensionamento e execução de edificações exclusivamente na sua resistência à ruptura (solicitações menores que resistência), mas negligenciando uma questão crucial: até quando a obra duraria nas condições adequadas de uso? O conceito determina condições mínimas para um produto cumprir sua função, sendo encerrada quando, por degradação ou obsolescência, não cumprir as exigências a que foi solicitado. Assim, devido à relevância do tema para a busca da racionalização da Engenharia Civil, a durabilidade deixou de ser um tema periférico e centrou-se nas discussões técnicas. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (VITÓRIO, 2003)

Atreiou-se, então, o conceito com o de desempenho das edificações, concretizado no Brasil principalmente com a publicação das seis partes da ABNT NBR 15575:2013 (Edificações Habitacionais – Desempenho). A normativa preencheu uma lacuna nos projetos e execuções das obras ao definir critérios e parâmetros mínimos de desempenhos para os sistemas de uma edificação (gerais, pisos, estruturas, vedações, coberturas e hidrossanitários). Apresentou-se à comunidade técnica nacional três níveis de desempenho e, com eles, a classificação da denominada Vida Útil de Projeto (VUP). (ABNT, 2013) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

A VUP é conceituada como uma medida de temporalidade, um prazo projetado mínimo em que a edificação deve apresentar condições mínimas de habitabilidade conforme o uso a que foi projetada. Para atingir tal objetivo, parâmetros de projeto, detalhamentos de projetos executivos, execução e planos de manutenção devem ser atendidos durante todo o ciclo de vida da edificação. Vale ressaltar que a VUP é uma idade mínima, podendo a obra apresentar durações superiores ao estipulado. Desse modo, a “vida” das edificações foi normatizada, sendo para estruturas: (ABNT, 2013) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

- VUP mínima: 50 anos;
- VUP média: 63 anos;
- VUP superior: 75 anos.

Nos projetos de concreto armado e protendido, por exemplo, a influência da ABNT NBR 15575:2013 no desempenho das obras materializou significativas mudanças na perspectiva de requisitos de durabilidade dos projetos. A ABNT NBR 6118:2023 (Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento), edição atual da norma que rege os principais aspectos de estruturas de concreto armado e protendido, apresentou inúmeros avanços desde a primeira edição. Unificada

apenas em 2003 na primeira edição, até então as tratativas de concreto eram fragmentadas em três referências (NB -1, NB -2, NB-3). Ressalta-se que a ABNT NBR 6118:2003 foi a primeira a apresentar um destaque para a durabilidade, com o uso das Classes de Agressividade Ambiental para classificar parâmetros de projeto para estruturas. Após a unificação, a norma foi novamente revisada em 2007 e 2014, com destaques para a de 2014 com uma reformulação significativa de métodos e formatação devido aos novos parâmetros de desempenho nacionais. No entanto, apenas em 2023, com a publicação da ABNT NBR 6118:2023 que surgiram atualizações de conceitos de durabilidade, atualização de critérios de Estados de Serviço, fissuras, retração, dentre outros, com um enfoque principal: garantir o desempenho e durabilidade das estruturas. Assim como a norma de projetos de concreto, demais normativas de edificações apresentam atualizações para se alinhar com os critérios exigidos pela ABNT NBR 15575:2013 e normas internacionais de qualidade. (ABNT, 2003) (ABNT, 2007) (ABNT, 2014) (ABNT, 2023) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

Essa evolução natural das normativas brasileiras, em conformidade com as internacionais, permitiu combater o estigma da falta de qualidade das obras atuais. Credita-se ainda que obras de antigamente tinham uma qualidade superior, visto não terem sido destruídas completamente pelo tempo. Casos consagrados como o do Coliseu de Roma (em torno de 1950 anos), a cidade de Jericó na Palestina (em torno de 11 mil anos) e o Templo de Luxor no Egito (em torno de 3500 anos) são usados para defender um argumento: antigamente, as obras duravam mais. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

No entanto, analisar o tema pelo *Viés da Sobrevivência* considera apenas as edificações duradouras, ignorando a existência de todas as demais que ruíram com o tempo. Ademais, como os métodos de dimensionamento eram menos precisos, o superdimensionamento era uma ferramenta convencional do passado. Por outro lado, as construções contemporâneas, focando no uso racional de materiais e tempos com o uso de inovações das engenharias e arquitetura, exigem um controle técnico e tecnológico que faz com que essas práticas antigas se tornem inviáveis e contraproducentes. Conclui-se, portanto, que os avanços na área não foram retrógrados, mas garantiram conciliar a demanda com a oferta e a recente preocupação com sustentabilidade. (SILVA, A, 2010) (SOUZA; MELHADO, 2015)

Das edificações antigas até as mais recentes, todas têm algo em comum: a vida útil delas não é infinita. Logo, mesmo que não se saiba exatamente o quando, certamente a construção perderá suas características e chegará à ruína. Diversos fatores podem garantir a VUP de um projeto, mas existem diversos fatores responsáveis por acelerar o processo, tendo destaque: (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

- Heterogeneidade dos materiais de construção;
- Mão de obra com baixo calibre técnico ou com ferramentas inadequadas;
- Erros de projeto e execução;
- Condições ambientais severas ou anômalas;
- Uso inadequado da edificação;
- Incompatibilidade de projetos executivos;
- Corrupção e desvios de verba, dentre outros.

Assim, as edificações funcionam de certa forma como um organismo vivo, ficam suscetíveis aos fatores externos e internos nos quais estão inseridas e, com o passar do tempo, envelhecem. Tal qual um organismo, as construções também apresentam manifestações de problemas que ocorrem/ocorreram ao longo de sua vida útil, com uma nomenclatura também parecida: as manifestações patológicas. Na engenharia civil, essas anomalias são analisadas pela área de Patologia das Construções, encarregada de analisar sintoma, origem, profilaxia, mecanismos de atuação, dentre outros para garantir a vida útil e, conseqüentemente, os desempenhos previstos em projeto. (VITÓRIO, 2003)

De um modo abrangente, as manifestações patológicas surgem decorrentes de erros. Essas falhas podem ser dos profissionais, fornecedores ou usuários e, devido à complexidade de fatores já mostrados, a edificação muito provavelmente apresentará um sintoma e cabe ao engenheiro civil a adequada análise e tratamento. Helene (2019) apresentou em seus estudos as principais origens da patologia das construções, sendo:

- Projeto: em torno de 36%;
- Execução: em torno de 31%;
- Materiais: em torno de 18%;
- Utilização: em torno de 11%;
- Outros: em torno de 4%.

Nota-se que o binômio execução/projeto consolida 67% das origens de patologias e problemas nas edificações, sendo duas das etapas mais cruciais em uma edificação. Tendo mais da metade da origem prevista de manifestações patológicas nas construções, este Trabalho de Conclusão de Curso investigou patologias estruturais em estruturas de concreto armado com enfoque na parte mais crítica do processo: o conjunto projeto e execução. Com uma abordagem conjunta entre teoria e investigação, o trabalho realizará um compilado teórico do tema atrelando a um estudo de caso, discutindo propostas de intervenção, origem dos problemas e perícias com embasamento técnico.

2. DOS OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso teve, portanto, o objetivo de realizar o estudo de caso de manifestações patológicas decorrentes do conjunto projeto/execução, responsável por mais da metade dos casos observados no âmbito nacional. A investigação foi conduzida em uma Obra de Arte Especial (OAE) de concreto armado, fundamentada em indícios de falhas estruturais e discutindo origem e propostas de intervenção com enfoque técnico associado a um levantamento bibliográfico amplo da temática.

Dos Objetivos Específicos, destacam-se:

- Levantar e classificar as inconformidades observadas em caso real de estruturas de concreto armado;
- Identificar falhas de projeto que tenham contribuído para o surgimento das manifestações patológicas;
- Apresentar o embasamento técnico e normativo relativo às patologias e técnicas de intervenção/adequação;
- Analisar criticamente as soluções adotadas em campo ou propor alternativas viáveis;
- Discutir a importância da qualidade do projeto estrutural e da compatibilização com execução e manutenção.

3. METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido em uma abordagem aplicada e qualitativa quanto a sua natureza, com ênfase nas áreas de Patologia das Construções e Estrutural da Engenharia Civil. Desse modo, propôs-se a seguinte metodologia:

3.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As discussões de levantamentos bibliográficos do tema abrangeram um estudo dos principais tipos e causas de anomalias estruturais, acompanhadas de uma análise crítica de obras no país quanto às normativas vigentes, destacando atualizações e inovações dos documentos e conservadorismo técnico. Foram considerados, também, os principais entraves na atuação de engenheiros civis relacionados à vida útil das edificações, considerando as técnicas de intervenção, reforço e reparo estrutural, destacando tanto metodologias clássicas quanto inovações aplicadas ao tratamento das patologias.

3.2. ESTUDO DE CASO

A seleção do caso para análise de manifestações patológicas relevantes, sejam elas decorrentes de erros projetuais ou executivos, compôs uma etapa fundamental do trabalho. Essa parte consistiu em uma análise técnica detalhada, envolvendo investigações, perícia, coleta de informações e o consequente detalhamento das patologias encontradas ou potenciais, conforme a origem descrita.

Para a seleção do caso, considerou-se:

- Tipologia: selecionados casos em que a estrutura concebida fosse de concreto;
- Localização: para considerar relevância do Trabalho em um contexto regional, procurou-se casos no município de Uberlândia (MG) e proximidades, a fim de garantir um acesso facilitado aos responsáveis e à edificação;
- Relevância: feita uma análise do estado de conservação da obra, relacionando as anomalias observadas com a idade da obra, verificando sua relevância para um Trabalho de Conclusão de Curso.

Para a verificação das patologias, propôs-se a visita à construção e registros fotográficos, verificação dos possíveis ensaios *in loco*, dentre outros que foram considerados necessários na investigação.

3.3. ANÁLISE TÉCNICA E CRÍTICA

Nesta etapa, foram avaliadas as manifestações encontradas, discutindo-se os prováveis diagnósticos, bem como propostas de intervenção adequadas. Além disso, apresentaram-se considerações referentes à durabilidade e à manutenção preventiva das edificações.

Para a análise das manifestações patológicas, consideraram-se as normativas vigentes, com destaque para a ABNT NBR 6118:2023 e a ABNT NBR 9452:2023, assim como embasamentos teóricos obtidos na fundamentação teórica, focando em erros de projetos, erros executivos e estudo das boas práticas de engenharia adotadas nas edificações.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES

A Patologia das Construções é um ramo da Engenharia Civil focado no estudo e sistematização de anomalias. Em termos gerais, uma edificação é construída com base em atender a alguma necessidade humana, podendo ser classificadas em: Laborais (quanto ao auxílio dos humanos em serviço para a sociedade – como edifícios corporativos); Habitacionais (relacionados à moradia e descanso – como residências) e de Infraestrutura (atender a necessidades básicas de insumos e logística – como viadutos, adutoras, metrô). No entanto, como não é esperada uma vida infinita dessas obras conforme já abordado, elas apresentam uma VUP mínima e envelhecem com o tempo. Esse envelhecimento natural é esperado, mas quando ele acontece precocemente, há prejuízos econômicos, sociais e de sustentabilidade que podem levar, nos piores cenários, a uma ruptura estrutural. (RIPPER; SOUZA, 2009)

Esse envelhecimento precoce é oriundo de falhas principalmente no conjunto projeto-execução. Observam-se então sintomas de problemas na edificação, como manchas, fissuras, deformações que devem ser cessados, pois prejudicam a VUP do empreendimento. Assim, como nas demais áreas da Engenharia, iniciou-se então um processo de sistematização de dados dessas manifestações e o estudo de suas origens e tratamentos, consagrando a área da Patologia das Construções – basicamente em um processo de aprender com os erros dos outros. Como no corpo humano, quando uma doença é verificada por um sintoma, inicia-se um processo padronizado e técnico com o auxílio de um profissional especializado para diagnosticar o caso e tratar tanto o fenômeno quanto a manifestação. Dessarte, o objetivo na Engenharia Civil não é o de construir edificações perenes com as eras como o Coliseu, mas garantir a VUP e a função social da obra de modo técnico. (RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

4.1. O ESTUDO SISTEMATIZADO DA PATOLOGIA: DA ORIGEM À TERAPIA

A Patologia das Construções se tornou uma área fundamental da Engenharia Civil que passou a observar os empreendimentos com enfoque no pós-obra, constantemente negligenciado. O país apresenta uma cultura de precariedade de manutenções e, aliadas a problemas de projetos, de execução e de planejamento, fazem com que as obras fiquem mais suscetíveis às agressões do ambiente. Essa vulnerabilidade observada é protagonista nas manifestações patológicas, seja como origem dos sintomas ou como um agravante crítico delas. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (VITÓRIO, 2003)

Assim, como o ambiente é condição obrigatória para todas as edificações, as manifestações patológicas se tornaram uma constante em todas as obras, alterando apenas a gravidade com que

se apresentam. Como os sintomas de doenças dos edifícios podem variar devido a um conjunto complexo de fatores (como localização, formato, contexto), surgiu a necessidade de um processo padronizado de análise dessas estruturas. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

Para o estudo sistematizado dessas manifestações, padronizaram-se métodos e terminologias essenciais para compreender os conceitos da área. A seguir, abordam-se os principais pontos relevantes e terminologias para os estudos iniciais em Patologia.

4.1.1. DESEMPENHO, VIDA ÚTIL E DURABILIDADE: UMA ANÁLISE DA ABNT NBR 15575-1:2013

A ABNT NBR 15575:2013 (Edificações Habitacionais — Desempenho) é a referência nacional, servindo de base teórica para a análise de desempenho na Construção Civil. A norma é um compilado que reúne requisitos e critérios antes fragmentados, analisando o conjunto dos sistemas da edificação para garantir o desempenho mínimo. (ABNT, 2013) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009)

O conceito de Desempenho se configura como o comportamento da edificação como um todo durante o uso. A Durabilidade é a capacidade dos sistemas da edificação garantirem suas funções ao longo do tempo, considerando as manutenções previstas, e é um termo qualitativo que verifica as condições dos sistemas face ao desgaste. A Vida Útil (VU) é o limite temporal em que os sistemas e o edifício atendem aos critérios mínimos de desempenho. Para análise econômica, criou-se a Vida Útil de Projeto (VUP), uma medida quantitativa teórica que norteia os projetos executivos. (ABNT, 2013) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009)

Naturalmente, o desempenho se reduz, e o fenômeno de redução da durabilidade é antecipado por Agentes de Degradação. A situação em que um sistema apresenta desempenho abaixo do limite é denominada falha, observada pelo usuário como manifestação patológica (irregularidades não decorrentes do envelhecimento natural). A ABNT NBR 15575:2013 articula requisitos, critérios e métodos de avaliação, distribuindo a responsabilidade pela qualidade aos fornecedores, VUP aos projetistas e garantias ao construtor. É de suma importância a responsabilidade do usuário quanto ao adequado cuidado da edificação, mediante o cumprimento do Manual do Usuário, o que permite elevar a VU real. (ABNT, 2013) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

Diferentemente das normas internacionais, a ABNT optou por uma flexibilização do parâmetro VUP, justificando-se pela necessidade de expandir o mercado de Construção Civil Popular e um

menor custo inicial de operação. Desse modo, nota-se um caráter socioeconômico da normativa, buscando compatibilizá-la à realidade antes de elevar os padrões apenas com viés técnico. Os valores de VUP de um projeto, classificados em Mínima, Intermediária e Superior podem ser consultados na Tabela C.5 da norma, representada neste trabalho como Tabela 1. (ABNT, 2013)

Tabela 1: Critérios para o estabelecimento da VUP das partes do edifício (Adaptado)

Sistema	VUP Mínimo (anos)	VUP Intermediário (anos)	VUP Superior (anos)
Estrutura	≥ 50	≥ 63	≥ 75
Pisos internos	≥ 13	≥ 17	≥ 20
Vedação vertical externa	≥ 40	≥ 50	≥ 60
Vedação vertical interna	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Cobertura	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Hidrossanitário	≥ 20	≥ 25	≥ 30

Fonte 1: ABNT NBR 15575-1:2023 (Adaptado)

4.1.2. TERMINOLOGIAS

As obras de engenharia, assim como o corpo humano, são compostas por partes essenciais, sistemas que, em conjunto, permitem seu correto funcionamento. Assim, pode-se associar: (VITÓRIO, 2003)

- Sistemas estruturais como sistemas esqueléticos – representam a estrutura, o sistema de enrijecimento, que permite sustentação e resistência aos determinados esforços;
- Sistemas de vedação como sistemas musculares – permitem dar volume, consistência e trabalham em conjunto para dar funcionalidade ao corpo;
- Sistemas de revestimento como pele – permitem isolar os sistemas do exterior, garantindo uma proteção extra e um apelo estético;
- Sistemas de instalações (como hidráulica e elétrica) como sistema circulatório – garantem a “vida” dos sistemas, provendo recursos necessários para a correta funcionalidade de cada um.

Mesmo havendo diversas variações para a analogia – esta, por exemplo, trata de obras reticuladas (sistemas laje-viga-pilar) – é possível chegar a uma conclusão em comum. Tal qual o corpo humano, os sistemas de uma edificação podem vir a apresentar doenças, não funcionarem adequadamente e precisarem de auxílio profissional. Assim, o “médico das obras” é protagonizado na figura do inspetor. Esse profissional, geralmente um engenheiro civil ou

arquiteto habilitado, estuda o comportamento dos sistemas e, principalmente, como compreender as patologias e tratamentos para garantir a adequada durabilidade e desempenho das componentes do construto. (VITÓRIO, 2003) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

Para o estudo da patologia em edificações, compreender o binômio segurança e economia é fundamental. Garantir a viabilidade econômica de uma construção é inerente ao mercado: não se constrói algo em que o retorno (econômico, social ou sustentável) não seja viável. Do mesmo modo, a garantia de manutenções e tratamentos de manifestações patológicas nas construções segue o mesmo princípio: deve garantir a segurança e os requisitos mínimos de desempenho ao usuário em conformidade com um gasto que apresente custo-benefício satisfatório. Assim, a VUP pode ser garantida com um custo reduzido quando seguidos corretamente os projetos, execução e planos de manutenção determinados por profissionais capacitados. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009)

Nesse contexto, a Patologia das Construções configurou uma sistematização da prática e teoria com o enfoque em garantir as melhores condições e assegurar a VUP dos projetos objetivando o melhor custo-benefício. Logo, como uma Ciência, criaram-se terminologias e nomenclaturas que permitiram uma uniformização dos estudos e o desenvolvimento dos métodos de análise. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

Helene (2019), em seus estudos, condensou as terminologias principais da área, criando praticamente um glossário didático. Para compreensão da área, além dos já destacados anteriormente, referenciam-se os seguintes termos: (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009)

- I. Patólogo/inspetor: profissional tecnicamente habilitado com conhecimento para trabalhar na área da Patologia das Construções;
- II. Anamnese: coleta de informações sobre a obra para criar um histórico detalhado da obra. Isso permite determinar de maneira mais efetiva um diagnóstico por meio de entrevistas, documentações, registros, dentre outros;
- III. Inspeção: atividade inicial do patólogo em que realiza a anamnese da edificação e faz uma vistoria de possíveis sintomas de manifestações patológicas;
- IV. Profilaxia: medidas preventivas adotadas em uma edificação para que as manifestações patológicas não ocorram. Como exemplo, destacam-se o atendimento aos requisitos normativos (Classe de Agressividade Ambiental (CAA), Desempenho, cobrimentos, dentre outros);
- V. Sintomatologia: objetiva analisar os efeitos das manifestações patológicas. Assim, analisa os sintomas de uma anomalia da edificação, com o uso de ferramentas, dos sentidos e da

experiência para permitir um diagnóstico inicial ou os ensaios necessários para levar a ele;

- VI. Mecanismos de degradação: processo com o qual se originou a degradação da obra, subdivididos em:
 - a. Mecanismos físicos: em que os sintomas são resultados de uma alteração volumétrica da componente da edificação. Surgimento de fissuras por dilatação térmica, processos de gelo e degelo representam exemplos comuns;
 - b. Mecanismos químicos: em que os sintomas são resultado da alteração química dos materiais da edificação. Esse processo ocorre por uma reação química que altera intrinsecamente o material, podendo resultar em mudanças de propriedades como aparência ou seu comportamento mecânico
 - c. Mecanismos biológicos (biodeterioração): alteração dos materiais devido a uma origem biológica, como microorganismos. São comumente associados a ambientes com alto teor de umidade ou em regiões com variações altas de ciclos de umidade e secagem;
 - d. Mecanismos Mecânicos: devido a esforços mecânicos gerados sobre os elementos. Geralmente associados a erros de projetos, sobrecargas inesperadas (mudança de uso sem análise estrutural), resultando em flechas excessivas, rupturas e fissuras que intensificam processos de manifestações patológicas.
- VII. Diagnóstico: interpretação profissional da manifestação patológica, com identificação do agente de degradação (mecanismo), origem, sintomas, tratamento e prognósticos. Etapa crucial do processo de investigação sendo crucial a coleta de informações que levem a uma análise correta do problema;
- VIII. Prognóstico: previsão de progresso da manifestação patológica para análise do custo-benefício da viabilidade de uma possível intervenção;
- IX. Origem: gênese do problema. Consiste em determinar o que gerou a manifestação, onde ocorreu a falha que resultou naquela situação.
- X. Agente causador/de degradação: principal circunstância que produziu a manifestação patológica, pode ser subdividido em:
 - a. Intrínsecos (internos): deterioração ocorre da própria edificação, seja por materiais utilizados, processos inadequados, falhas de concepção, dentre outros. Processo de “dentro para fora”;
 - b. Extrínsecos (externos): deterioração decorre do ambiente externo em que a obra está inserida, um processo de “fora para dentro” como fatores climáticos e maresia;
- XI. Terapia/profilaxia: intervenção para solucionar o problema. Cabe ressaltar que o sucesso desta etapa depende da correta interpretação e diagnóstico das manifestações patológicas,

interferindo diretamente na origem do problema. Caso contrário, em que se trate apenas dos sintomas, os agentes de deterioração retomarão o processo de manifestação patológica persistindo os sintomas. A profilaxia pode ser realizada de 5 modos (denominados 5R), sendo eles:

- a. Reabilitação: retomada do desempenho adequado de uma estrutura deteriorada;
- b. Recuperação: técnicas e intervenções com objetivo de sanar anomalias presentes em uma edificação, podendo ser:
 - i. Reparo: restauração dos componentes e peças degradadas para a recuperação da estrutura como um todo;
 - ii. Reforço: aumento da estabilidade e resistência da estrutura, sendo recomendada para casos de ruptura estrutural, rompimento dos estados limites que comprometam consequentemente a segurança estrutural da edificação;
 - iii. Restauro: condição de recuperação de edifícios de importância sociocultural, priorizando uso de técnicas e materiais que não comprometam a integridade histórica da edificação o máximo possível;
- c. Reforma: pode alterar as condições de uso e formas da estrutura, sem nenhum compromisso com valores socioculturais, apenas com necessidade de respeitar as normativas técnicas vigentes;
- d. Reconstrução: construção parcial ou total de uma edificação finalizada, mas com iminência de ruptura ou já abalada/destruída por algum motivo;
- e. *Retrofit*: revitalização de edifícios antigos, mas trazendo-os para o contexto atual. Diferentemente do restauro, em que se mantém na integralidade ou o mais próximo possível as condições originais, no *retrofit* se prioriza o contexto histórico com as melhorias e inovações do presente, compatibilizando passado e futuro em uma edificação.

4.2. CORROSÃO DE ARMADURAS

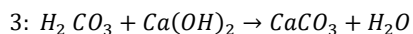
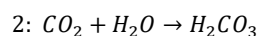
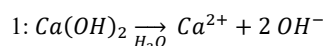
A corrosão de armaduras é um fenômeno patológico grave em estruturas, caracterizado por uma degradação eletroquímica que converte o aço em ferrugem (óxidos e hidróxidos ferrosos), reduzindo a área útil da armadura. Esse processo é expansivo, gerando pressão interna no concreto que causa tensões de tração, podendo levar a fissuras e à expulsão das camadas de cobrimento no processo de deslocamento. O rompimento do concreto – que é um dos elementos de proteção da armadura – por tração permite a entrada de mecanismos de degradação em uma escala ainda maior. O fenômeno é crítico porque pode ser desencadeado por outros mecanismos de

deterioração do material. Uma vez iniciado, o processo compromete a proteção da armadura, expondo as barras a meios agressivos. Por ser um processo de crescimento progressivo, seu prognóstico sem tratamento é a falência estrutural parcial ou integral da edificação. Em concretos protendidos, os rompimentos podem ser frágeis e sem avisos, justificando um elevado controle tecnológico.

A origem da corrosão de armaduras é a desp passivação do aço, que compromete a camada de alcalinidade protetora da armadura. Isso ocorre principalmente por dois processos: carbonatação e ataques de íons cloretos. Esses mecanismos de degradação reduzem o pH do meio, o que permite o surgimento de uma pilha eletroquímica que degrada o ferro da estrutura.

4.2.1. MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO: PROCESSO DE CARBONATAÇÃO

O concreto armado depende do controle de pH para a passivação das armaduras, sendo o Hidróxido de Cálcio ($Ca(OH)_2$) o principal responsável por manter o meio básico. O composto, formado na hidratação, dissocia-se na água dos poros liberando íons OH^- (hidroxila) que garantem o pH elevado, conforme Reação 1. O processo de carbonatação se inicia quando o gás carbônico atmosférico (CO_2) penetra nos poros e, na presença de água, forma ácido carbônico (H_2CO_3) conforme Reação 2. Em seguida, o ácido carbônico reage com o $Ca(OH)_2$ para formar carbonato de cálcio e água (Reação 3). Como o concreto é um sistema aberto, essa reação se aproxima da irreversibilidade, fazendo com que a entrada contínua de CO_2 aumente a concentração de $CaCO_3$: (RIPPER; SOUZA, 2009) (BAUER, 2019) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (VITÓRIO, 2003)



Diferentemente do CO_2 , a quantidade de $Ca(OH)_2$ é limitada, levando à redução dos íons hidroxila e consequente acidificação do meio. Essa alteração de pH compromete a camada de passivação das armaduras, tornando-as suscetíveis à corrosão. Embora o Carbonato de Cálcio possa ser benéfico para o concreto simples ao aumentar a resistência, no concreto armado, a desp passivação é crítica. A formação do $CaCO_3$ também reduz a velocidade da carbonatação ao longo do tempo, pois o sólido começa a fechar os poros (colmatação), dificultando a difusão de CO_2 . (RIPPER; SOUZA, 2009) (BAUER, 2019) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

A norma ABNT NBR 6118:2023 destaca o fenômeno da “Despassivação por carbonatação” como um processo patológico que pode ser minimizado pela adoção do adequado cobrimento nominal das armaduras e controle dos limites de fissuração do concreto armado (tratado no tópico 4.7). Destaca-se ainda que o processo pode ser influenciado pela relação água/cimento do concreto, que potencializa o número de poros e a interconectividade entre eles. Este fator é considerado na limitação que a norma faz para o fator a/c para sua Classe de Agressividade Ambiental (CAA). Os valores de cobrimento e a/c podem ser encontrados na Tabela 2 e Tabela 3. (ABNT, 2023) (RIPPER; SOUZA, 2009)

Tabela 2: Relação a/c máxima e Classe de Concreto mínima para cada CAA

	Tipo de Concreto	Classe de Agressividade I	Classe de Agressividade II	Classe de Agressividade III	Classe de Agressividade IV
Relação a/c	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de Concreto	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

Fonte: ABNT, 2023 (Adaptado)

Tabela 3: Cobrimentos nominais normativos (em mm)

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
Concreto armado	Viga/pilar	25	30	40	50
Concreto armado	Elementos estruturais em contato com o solo	30	40	40	50
Concreto protendido	Laje	25	30	40	50
Concreto protendido	Viga/pilar	30	35	45	55

Fonte: Fonte: ABNT, 2023 (Adaptado)

Ressalta-se que existem outros compostos que auxiliam na manutenção do pH do concreto armado, como os hidróxidos de sódio e potássio. No entanto, como são extremamente solúveis em água, contribuem para um pH básico logo no início do endurecimento do concreto, enquanto o $CA(OH)_2$ contribui a longo prazo, sendo o mais afetado pelo processo de carbonatação. (MEHTA; MONTEIRO, 2010) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

4.2.2. MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO: ATAQUES DE CLORETO

Os cloretos (Cl^-) são sais que podem ingressar no concreto por meios extrínsecos (externos) e intrínsecos (internos). A entrada extrínseca ocorre por difusão física, sendo comum em regiões litorâneas (carreamento por vento), onde os sais são depositados e carreados pela chuva para

dentro dos poros. Também ocorre por ciclos de gelo e degelo (facilitando fissuras), zonas de respingo e variação de maré, solos contaminados (por capilaridade) e limpezas com produtos à base de cloro. Como agentes intrínsecos, destacam-se a contaminação da matéria-prima (agregados, água e cimento) e o uso de aditivos aceleradores de pega do concreto. A ABNT NBR 12655:2022 (Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento) limita o teor máximo de cloretos para mitigar a corrosão do aço conforme apresentado na

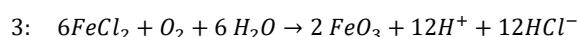
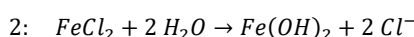
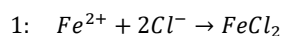
Tabela 4. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009) (ABNT, 2022)

Tabela 4: Teores máximos de íons cloreto por condição de serviço

Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl^-) no concreto (% sobre a massa de cimento)
Concreto protendido	0,05
Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,3
Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,4

Fonte: ABNT, 2022

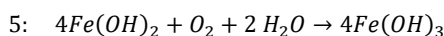
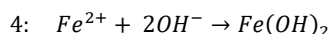
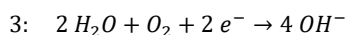
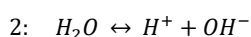
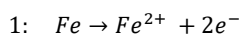
Ao serem incorporados ao sistema, os íons cloreto podem se combinar quimicamente com compostos do cimento formando cloroaluminatos, ficar adsorvidos nos poros ou livres na solução aquosa. No concreto armado, o íon cloreto funciona como um catalisador, pois intensifica a velocidade das reações químicas sem ser consumido, o que é um fator crítico: ele despassa a armadura, e, ao final do ciclo de reação com o ferro, é liberado novamente para reiniciar o processo, tornando-o cíclico e grave mesmo em baixas concentrações. A sequência de reações leva à oxidação do ferro e à formação de cátions H^+ (que acidificam o meio), perpetuando a corrosão conforme as reações a seguir. Além de despassivação e corrosão, altas concentrações de Cl^- contribuem para patologias como endurecimento prematuro em dias quentes, intensificação da corrosão eletrolítica, corrosão de materiais metálicos embutidos e retração intensificada com surgimento de fissuras. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009)



4.2.3. PROCESSO DE CORROSÃO ELETROQUÍMICA

O concreto armado protege as armaduras por meio de um mecanismo físico-químico. Os hidróxidos presentes nas primeiras idades (como de sódio e de potássio) criam um ambiente extremamente alcalino na umidade dos poros, o que forma um "filme passivador" sobre o aço, funcionando como proteção química. Quando essa película é degradada pela acidificação do meio (por carbonatação ou ataque de cloretos), surge o mecanismo ideal para um processo eletroquímico que atua como uma pilha galvânica, composta por: o eletrólito (concreto úmido, que conduz os íons); o Condutor (a barra de aço, que transporta elétrons); o Polo Positivo (Região Anódica), onde ocorre a Oxidação do ferro; e o Polo Negativo (Região Catódica), onde ocorre a Redução e o consumo de elétrons. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009) (GENTIL, 2011 *apud* MEHTA E MONTEIRO, 2014).

O processo se inicia na região anódica, onde o ambiente acidificado altera o equilíbrio energético. O ferro perde elétrons na oxidação (Reação 1), separando-se da armadura e formando cátions de Ferro (Fe^{2+}) e elétrons livres (e^-). Os elétrons liberados migram pela barra para a região catódica (Polo -). Lá, na presença de oxigênio e água, ocorre a redução (Reações 2 e 3), onde os elétrons consomem oxigênio e água para aumentar a produção de hidroxilas. Em seguida, os cátions de Ferro reagem com os íons OH^- formando hidróxidos de ferro (Reação 4). Esses compostos são instáveis e continuam a degradação, expandindo em volume e formando a ferrugem (Reação 5) conforme nas reações abaixo. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)



A Figura 1 mostra os processos apresentados.

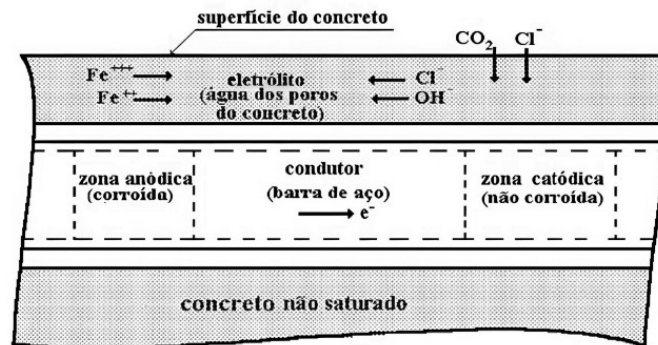


Figura 1: Esquema da Corrosão eletroquímica em uma barra (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

A cada etapa desses processos, ocorre uma expansão de volume, podendo atingir entre 4 e 10 vezes o volume inicial da barra. Com essa expansão, surgem tensões de tração no concreto que podem desencadear fissuras longitudinalmente às barras afetadas. Quando a corrosão atinge uma área maior, promove o deslocamento de camadas de concreto. A Figura 2 ilustra o processo e a Figura 3 apresenta o exemplo de comprometimento de armadura por corrosão de um edifício em Uberlândia-MG. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (VITÓRIO, 2003) (RIPPER; SOUZA, 2009)

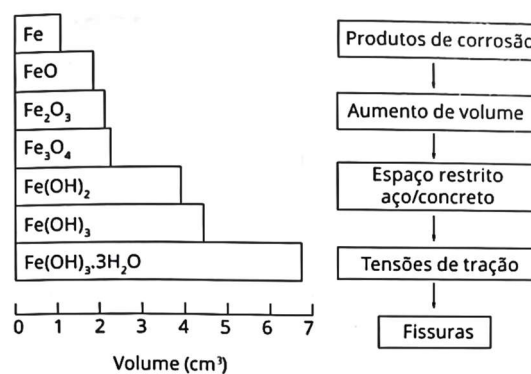


Figura 2: Comparativo dimensional dos compostos gerados na corrosão (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)



Figura 3: Processo de corrosão de armaduras em edifício de Uberlândia - MG (Acervo Próprio, 2025)

4.2.4. CONSIDERAÇÕES DO PROCESSO

O processo de corrosão é estritamente dependente da presença de oxigênio e umidade no concreto. A ausência de qualquer um deles (seja por saturação total, como em submersão, seja por completa secura) encerra a corrosão, pois inviabiliza o eletrólito ou a oxidação. A proteção conferida pela alta alcalinidade do pH (alta concentração de hidroxilas) nessas condições inibe a corrosão, exigindo alta energia para iniciar a oxirredução, tornando o processo insignificante. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009)

É consenso que, quando a camada passivadora é comprometida e a corrosão se inicia, a vida útil de projeto da estrutura cessa, demandando intervenção. Quanto aos mecanismos, o ataque por íons cloreto é mais intenso devido ao efeito catalítico (reciclagem dos íons), mas atinge regiões pontuais da barra; enquanto a carbonatação é menos crítica em intensidade, mas se manifesta de maneira mais distribuída ao longo da armadura. (GENTIL, 2011 *apud* RIPPER; CUSTÓDIO, 2009) (RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

4.3. ABERTURA DE FISSURAS E TRINCAS

As construções são constituídas por uma cadeia de sistemas formados de materiais. Conforme a ABNT NBR 15575:2013, a qualidade desses materiais é um fator preponderante no sucesso dos empreendimentos. Sob a ação de um esforço, os materiais apresentam alongamentos ou deformações. Essa força aplicada sobre uma área gera tensões que resultam em alteração dimensional. No regime elástico, há proporcionalidade entre tensão σ e deformação ε , seguindo o Módulo de Deformabilidade Longitudinal (Módulo de Young), em que a deformação é idealmente reversível, conforme a equação: (ABNT, 2013) (BOTELHO, 2013)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Ao se aumentar a força, alguns materiais mantêm o limite elástico até a ruptura frágil (brusca, sem avisos). Outros entram no regime plástico quando, ao cessar o esforço, permanecem com uma deformação residual. Materiais plásticos se deformam transversalmente, como na estricção (redução da seção transversal sob tração), caracterizando a iminência de ruptura dúctil, o que oferece um alerta de falha. O concreto armado apresenta um regime elástico inicial que respeita a Lei de Hooke, seguido por um regime plástico. Individualmente, o concreto tem grande resistência à compressão com ruptura frágil, enquanto o aço possui elevada ductilidade e bom desempenho à tração. A aderência entre o aço e o concreto no concreto armado é a grande vantagem do material, conferindo boa resistência tanto à compressão quanto à tração. Segundo a ABNT NBR 6118:2023, pode-se considerar um diagrama genérico de tensão deformação do concreto armado conforme a Figura 4. (HIBBELER, 2019) (BOTELHO, 2013) (ARAÚJO, 2014) (ABNT, 2023)

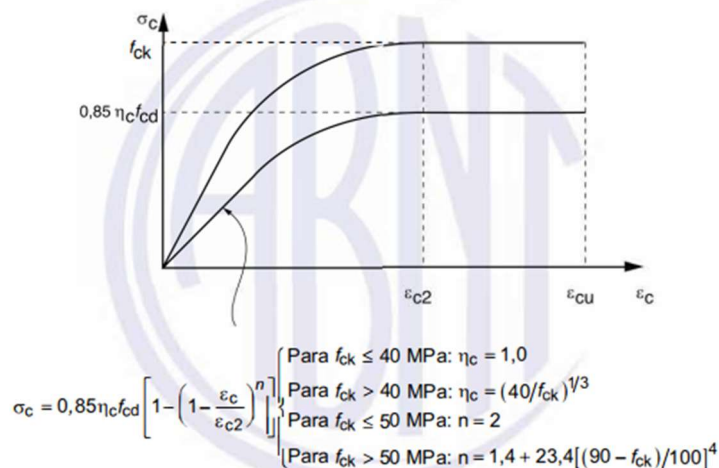


Figura 4: Diagrama idealizado de tensão-deformação (ABNT, 2023)

Para um melhor desempenho do concreto armado à flexão, é necessário que os esforços de tração promovam o microfissuramento do concreto. Desse modo, o concreto, com baixa resistência à tração, rompe, permitindo que o aço absorva os esforços transferidos por meio da aderência. Em estruturas sem concreto protendido, o microfissuramento garante o desempenho da seção, permitindo ao aço escoar. (HIBBELER, 2019) (BOTELHO, 2013) (ARAÚJO, 2014)

As fissuras como processo patológico são aberturas oriundas de tensões internas que superaram a resistência do material. No entanto, a ABNT NBR 6118:2023 tolera um limite de abertura de fissuras em estado de serviço, desde que adequadamente dimensionado. Elas se tornam um

agravante quando superam esses limites. As consequências das fissuras incluem: surgimento de anomalias oportunistas nas armaduras (corrosão) e no concreto (umidade); comprometimento da distribuição de tensões; prejuízo estético; e redução das características de desempenho. (THOMAZ, 2021) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (ABNT, 2023)

As aberturas são categorizadas pela sua magnitude, sendo os valores consolidados na literatura: Fissuras (até 0,5 mm); Trincas (de 0,5 mm a 1,0 mm); Rachaduras (de 1,0 mm a 1,5 mm) e Fendas (maiores que 1,50 mm). As aberturas são definidas com base na sua origem e devem ser analisadas quanto à sua passividade: se o grau de abertura varia com o tempo, é denominada ativa; se se mantém sem mudanças dimensionais, é passiva. Para facilitar as considerações, condicionou-se o uso dos termos fissuras e trincas para explicar os conceitos das aberturas, independentemente de sua classificação. A seguir são apresentadas as principais origens das fissuras. (THOMAZ, 2021)

4.3.1. ABERTURAS POR MOVIMENTAÇÃO TÉRMICA

A movimentação térmica dos materiais é um fenômeno que ocorre quando se adiciona ou retira energia térmica da estrutura atômica do composto, alterando a energia vibracional dos átomos e, conseqüentemente, a distância interatômica. Ao absorver calor, essa energia é convertida em vibração, fazendo a distância interatômica aumentar e a posição média dos átomos se deslocar levemente. Esse deslocamento em cadeia promove a expansão do material, que pode ser isotrópica (igual em todas as direções) ou anisotrópica. A variação dimensional é comparada pelo coeficiente de dilatação térmica, que correlaciona a variação dimensional com a variação de temperatura, sendo que quanto mais forte a ligação atômica, menor será a variação dimensional. (CALLISTER; RETHWISCH, 2016) (HIBBELER, 2019)

Em condições reais, os materiais raramente dispõem de condições ideais sem resistência à dilatação, estando vinculados entre si por apoios ou aderências. Desse modo, o movimento encontra uma resistência que origina tensões internas nos materiais, no sentido oposto ao movimento: movimentos expansivos resultam em tensões de compressão, e movimentos de contração ocasionam em tensões de tração. A tensão gerada pelo efeito da dilatação térmica é dada pela fórmula: (CALLISTER; RETHWISCH, 2016) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (ABNT, 2013) (ABNT, 2023)

$$\sigma = \begin{cases} 0, & \text{quando não há vinculações;} \\ \eta \cdot E \cdot \alpha_i \cdot \Delta T, & \text{quando há vinculações intermediárias} \\ E \cdot \alpha_i \cdot \Delta T, & \text{quando em apoio idealmente rígido} \end{cases}$$

Sendo,

α_i : coeficiente de dilatação térmica;

$\Delta T = T_o - T_f$: Incremento de temperatura;

E: Módulo de Elasticidade (de Young);

η : coeficiente de ponderação da rigidez do apoio.

Logo, se a tensão gerada for superior à resistência do material, ocorre a ruptura. Para materiais cerâmicos, a baixa resistência à tração pode levar a uma ruptura frágil, especialmente por choques térmicos (mudança brusca de temperatura). (CALLISTER; RETHWISCH, 2016) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (ABNT, 2013) (ABNT, 2023)

Destaca-se a importância das juntas de dilatação, que absorvem parte dos esforços criados pela dilatação por apresentarem um maior potencial de elasticidade. O fissuramento por movimentação térmica é uma tentativa falha de equilíbrio de tensões resistentes e solicitantes que resulta na ruptura do elo mais fraco ao esforço analisado. Na construção civil, o principal fator é a exposição solar, intensificada pela umidade relativa do ar, direção dos ventos e propriedades térmicas dos materiais. (THOMAZ, 2021) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

As trincas por movimentos térmicos podem ter origem em três fatores: União de materiais diferentes, onde movimentações diferenciadas entre elementos ligados (devido aos distintos coeficientes de dilatação) geram fissuras na região do encontro (como em platibandas e argamassa/blocos); Exposição de elementos a variações térmicas distintas, comum em lajes de forro onde a laje tenta se movimentar com resistência da vinculação, gerando flexão e solicitando a alvenaria com esforços de tração e cisalhamento, o que gera fissuras longitudinais; e Gradientes de temperatura em um mesmo componente, que intensificam as tensões em pontos específicos, dependendo da capacidade de condução térmica do elemento. (BOTELHO, 2013) (CALLISTER; RETHWISCH, 2016) (THOMAZ, 2021)

As fissuras também podem ocorrer por ciclos intensos de gradientes de temperatura, que geram a fadiga dos materiais. O concreto, por suas características frágeis, apresenta a ruptura por tração intensificada pela movimentação térmica, sendo que armaduras mínimas convencionais de lajes de cobertura são, por vezes, inferiores à armação para combate de variações térmicas, conforme disposto na ABNT NBR 6118:2023. (SOUZA; MEDALHO, 2015) (ABNT, 2023) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

A seguir, apresentam-se nas Figura 5 a Figura 8 as características sistematizadas de fissuras térmicas. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)



Figura 5: Comportamento de fissuras resultantes do abaulamento e dilatação de laje de cobertura (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)



Figura 7: Destacamento de alvenaria com estrutura reticulada por movimentações térmicas distintas (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)



Figura 6: Trinca devido a esforços de cisalhamento da dilatação de uma laje de cobertura - rompimento destacado na argamassa (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

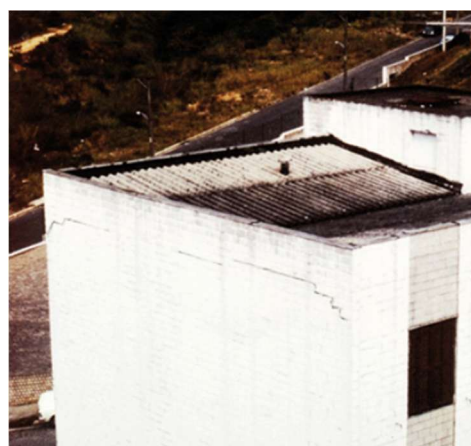


Figura 8: Destacamento da platibanda por movimentação térmico (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

4.3.2. ABERTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO E ALTAS TEMPERATURAS

O incêndio produz no concreto um efeito de perda de resistência, e a norma brasileira regente é a ABNT NBR 15200:2024. O concreto é um material de baixa condutividade térmica, concentrando os efeitos do incêndio nas camadas mais externas, como no cobrimento das armaduras. A grande preocupação patológica é a perda de água. Nesse cenário, a água do concreto se eleva de temperatura, mas a porosidade limitada e o aquecimento rápido levam o líquido a ficar

enclausurado, intensificando a pressão na matriz cimentícia. Simultaneamente, inicia-se o microfissuramento na interface agregado/pasta cimentícia devido às movimentações térmicas divergentes dos compostos heterogêneos. (ABNT, 2024) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (SOLLERO; SANTOS, 2015)

Como consequência, a pressão do vapor gerado aumenta a ponto de explodir o concreto de dentro para fora, sendo muito comum o fenômeno de deslocamento e exposição da armadura. Além disso, há a incidência de fuligem (particulados finos à base de carbono) oriunda da combustão, que impregna no concreto e pode entrar em contato com o aço, acelerando o processo de deterioração. (SOLLERO; SANTOS, 2015) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

Para contextos críticos, como túneis imersos em corpos hídricos, a análise da situação de incêndio é relevante. Nesses casos, o aumento da fissuração aliado à pressão externa da água pode levar a estrutura à ruína. Em concretos de Ultra Alto Desempenho, a existência de poros é bastante reduzida, levando a um deslocamento intensificado pela falta de permeabilidade. A Figura 9 e Figura 10 apresentam uma situação de ensaio de estrutura de concreto armado em situação de incêndio. (DUAN *et al.*, 2023)



Figura 9: Abertura de fissuras na face oposta ao incêndio devido à microfissuração do composto e a pressão de fuga de água com 27 minutos de ensaio (DUAN *et al.*, 2023)



Figura 10: Fissuração e fuga de água da peça de concreto com 58 minutos de ensaio (DUAN *et al.*, 2023)



Figura 11: Concreto pós-incêndio fissurado com acúmulo de fuligem (SOLERO; SANTOS, 2015)

4.3.3. ABERTURAS POR MOVIMENTOS HIGROSCÓPICOS

As fissuras por movimentação higroscópica seguem princípio semelhante às térmicas: pela geração de tensões no sistema devido a expansão ou contração de materiais. A diferença está na origem das aberturas que, neste caso, é resultado dos movimentos da água. (THOMAZ, 2021)

Os materiais, com destaque para os cerâmicos, apresentam expressivas características de absorvidade e porosidade. A formação de poros é intrínseca ao produto, desde falhas na estrutura atômica como até mesmo falhas de queima, métodos de produção (como matérias primas em formato de pó). Quando estes poros possuem interconexões, ocorre a formação de microcanais no interior do material, por onde os fluidos têm seu deslocamento facilitado. A essa movimentação se denomina permeabilidade. (CALLISTER; RETHWISCH, 2016) (BAUER, 2019)

A água está presente nos poros dos materiais, tendo sua origem desde os processos de fabricação do produto (água enclausurada); por condição e exposição (chuvas, enxurradas, ambientes úmidos) e até mesmo nos métodos de execução (umidificação de alvenaria de blocos para evitar a absorção de água das argamassas). Dependendo da origem, a movimentação do líquido gera efeitos distintos no material, em geral de expansão ou contração. Ressalta-se que, neste tópico, trata-se apenas características da movimentação de água de um composto, sendo fenômenos relacionados à retração definidos no tópico 4.4. (THOMAZ, 2021) (BAUER, 2019)

Quando a água provém dos processos de fabricação do produto, suas movimentações interferem diretamente em sua estrutura promovendo deformações de caráter permanente. A esses movimentos, denomina-se movimentação irreversível. Esse é o caso de contração de blocos

cerâmicos pelo processo de queima, com a movimentação da água no sentido interno-externo da matéria prima. Esse processo higroscópico ocorre nas primeiras idades do material, com indicadores de incidência nos primeiros meses de uso do produto. (THOMAZ, 2021) (CALLISTER; RETHWISCH, 2016)

Quando essa movimentação higroscópica ocorre após estabilizada a estrutura do composto, sua movimentação resulta em tensões para tracionar (expandir) ou comprimir (reduzir) o material. Desse modo, ocorrem deformações conforme o Módulo de Deformabilidade do material permitir e, cessado o esforço, a tendência é a de retornar ao tamanho original. Denomina-se esse processo de movimentação reversível. (THOMAZ, 2021)

A fissuração ocorre quando esse material apresenta vinculação com as estruturas adjacentes e as tensões geradas levam a falha de componentes da edificação. Esse fenômeno é bastante comum em materiais cerâmicos, com destaque a alvenarias pelo processo de Expansão por Umidade (EPU) – em que movimentações irreversíveis iniciam uma expansão do material em primeiras idades. (THOMAZ, 2021) (BOTELHO, 2013) (CALLISTER; RETHWISCH, 2016)

O comportamento de fissuração ocorre dependendo da vinculação, tipo de material e localização do material na estrutura. Podem-se destacar: (THOMAZ, 2021)

- Fissuras em painéis: esforços expansivos no conjunto resultam na compressão da alvenaria e tração da estrutura de concreto. Nas alvenarias, as aberturas apresentam características horizontais (sentido do esforço principal pelas dimensões comumente adotadas nos blocos) e no concreto fissuras perpendiculares ao vão da peça na zona de tração e trincas inclinadas na região de encontro com pilares pelos esforços cisalhantes. (Figura 12 e Figura 13)
- Encontro de alvenarias em junta prumo com estruturas da edificação (como pilares): a expansão por absorção de umidade separa a parede da estrutura, prejudicando a estanqueidade da obra. Essas trincas têm formação longitudinal no encontro das peças e verticalizadas no encontro com pilares; (Figura 14)
- Fissuras por falha de aderência entre argamassa e bloco: as tensões geradas rompem a aderência argamassa/bloco. A formação de fissuras se dá na região da ligação;
- Encontro das alvenarias com fundação superficial (comumente vigas baldrame): na região dos alicerces, devido a falhas de impermeabilização ou impedimento do contato da água com o meio externo, o líquido encontra a parede no processo de ascensão capilar. Nesse cenário, ocorre a abertura de uma trinca na região do encontro da primeira fiada da alvenaria com as demais. Características desse tipo de abertura são a presença de

anomalias como criptoflorescências e eflorescências, destacadas no tópico 4.5; (Figura 15)

- Regiões de alteração do fluxo de água na estrutura: comum em topos de muros e platibandas desprotegidas, peitoris e pingadeiras mal executados. Devido a alteração do fluxo da água, pode ocorrer a infiltração do líquido nas falhas ou por percolação, promovendo a expansão dos materiais, contínua intensificação das trincas, ataques biológicos (tópico 4.5) até o ponto de promover o deslocamento da camada de revestimento argamassado presente.

Destaca-se ainda que os fenômenos de expansão são intensificados quanto mais argiloso for o material. Portanto, vedações de solo-cimento, solo-estabilizado e argilominerais apresentam uma tendência maior de fissuramento e destacamento de revestimentos. As figuras a seguir apresentam os esquemas mais clássicos de fissuras por movimentação higroscópica. (THOMAZ, 2021)

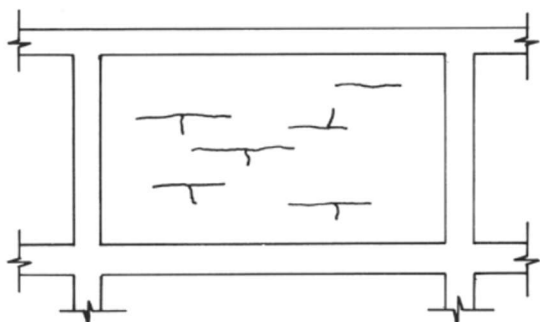


Figura 12: Formação típica de fissuras por EPU (THOMAZ, 2021)

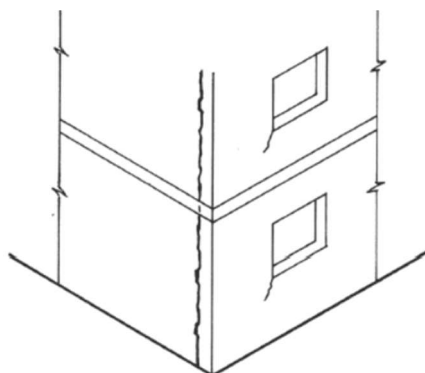


Figura 14: Fissuras por movimentação higroscópica em regiões de encontro pilar/alvenaria (THOMAZ, 2021)

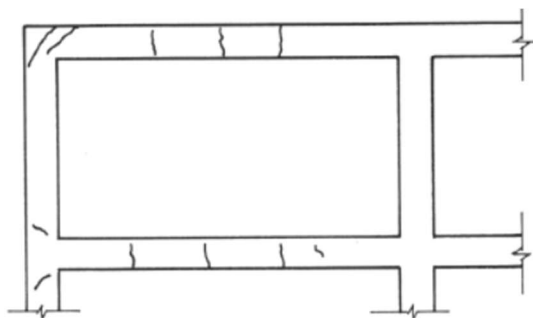


Figura 13: Formação de fissuras na estrutura por movimentos expansivos do painel (THOMAZ, 2021)

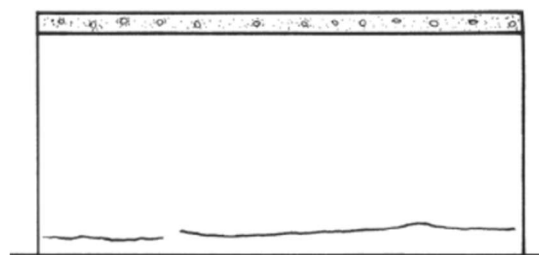


Figura 15: Fissura na base da alvenaria por ascensão capilar da fundação (THOMAZ, 2021)

4.3.4. FISSURAS POR SOBRECARGA ESTRUTURAL

As fissuras apresentadas neste tópico também podem ser oriundas de falhas de detalhamento de projetos ou incongruências no projeto estrutural. Essas origens e as verificações de limites de abertura de fissura e critérios de projeto serão abordados no item 4.7. Destacam-se aqui apenas os modelos de fissuras por esforços e as principais origens por erros executivos.

Durante a construção, as sobrecargas podem ocorrer por diversas maneiras, destacando-se: (THOMAZ, 2021) (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015)

- Descimbramento prematuro: a retirada antecipada de escoras resulta em esforços atuantes antes do concreto atingir a adequada resistência para absorvê-lo;
- Armazenamento indevido: armazenamento de materiais de construção como sacos de cimento e maquinário não previsto em projeto pode gerar cargas superiores às previstas principalmente em lajes;
- Recalques de fundação ou ações do solo: devido à heterogeneidade do solo, há a ocorrência de esforços diferenciais na estrutura, promovendo uma redistribuição de esforços.

Em estruturas monolíticas, o funcionamento do sistema é considerado em conjunto, como um só. Enquanto isso, estruturas pré-moldadas e pré-fabricadas apresentam comportamentos de sistemas separados. Essas diferenças alteram a condição de distribuição dos esforços internos e origens de fissuras. Um exemplo disso é que, em condições pré-fabricadas, o transporte e manuseio inadequado da peça podem gerar esforços que levem a danificar a peça. Recomenda-se também no caso de estruturas não monolíticas o uso de “amortecedores” na região dos apoios, comumente a base de policloropreno (Neoprene) ou elastômeros semelhantes. (THOMAZ, 2021) (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015) (PFEIL, 1978)

4.3.4.1. *Fissuras em Lajes*

As principais origens de fissuras em lajes podem ser destacadas como sendo: (RIPPER; SOUZA, 2009) (THOMAZ, 2021)

- Falta de armadura negativa na região de apoios: a ocorrência de momentos negativos superiores ao momento de fissuração leva ao surgimento de fissuras que acompanham toda a distribuição de tensões ao longo do apoio na face superior da laje; (Figura 16 a-b)

- Falta de armadura de combate aos momentos positivos: resulta em fissuras ao longo de toda a laje com formato que se assemelha à distribuição de tensões para os apoios por meio do quinhão de cargas (Figura 17 b)
- Momentos volventes: resultados da variação de momentos em lajes armadas em duas direções ou recalques diferenciais, geram torção principalmente nas quinas das lajes, com fissuras inclinadas e estriadas; (Figura 18)
- Espessuras inadequadas de concreto: levam o concreto a uma ruptura por esmagamento. (Figura 17 a)

Destaca-se que em lajes armadas em uma direção, as aberturas por flexão e compressão são formadas paralelamente à maior dimensão da laje. As figuras abaixo apresentam os principais modelos de trincas em lajes. (RIPPER; SOUZA, 2009) (THOMAZ, 2021)

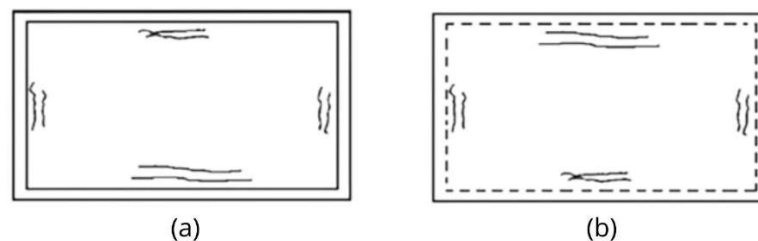


Figura 16: Fissuras por deficiência de armaduras negativas nas faces inferior (a) e superior (b) (RIPPER; SOUZA, 2009)

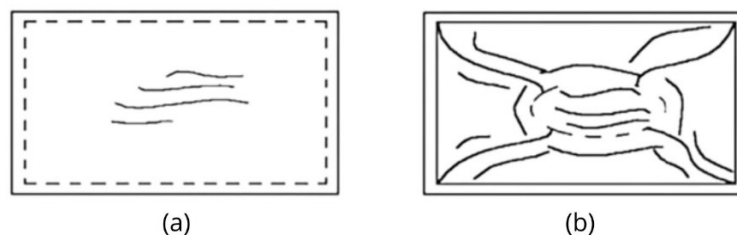


Figura 17: Fissuras de esmagamento de concreto por falta de espessura de laje (a) e fissuras por insuficiência de armadura de flexão positiva (b) (RIPPER; SOUZA, 2009)

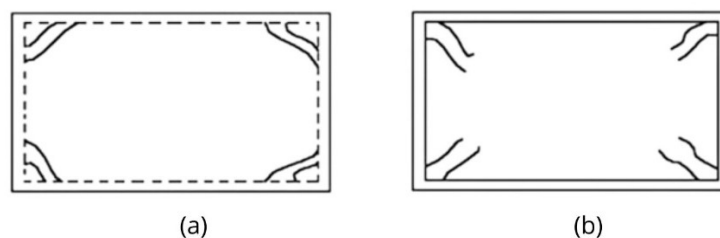


Figura 18: Fissuras geradas por momentos volventes em lajes nas faces superior (a) e inferior (b) (RIPPER; SOUZA, 2009)

4.3.4.2. *Fissuras em Vigas*

Do mesmo modo, as vigas apresentam fissuras distintas com base no esforço. No caso da tração excessiva, as aberturas se originam pelo rompimento do concreto. Como em geral as vigas apresentam carregamentos verticais a favor da gravidade, há uma tendência de ocorrerem aberturas na região das fibras inferiores, com um comportamento vertical no terço médio dos vãos e inclinação progressiva até a região dos apoios por influência do aumento do esforço cortante. (RIPPER; SOUZA, 2009) (THOMAZ, 2021) (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015) (VITÓRIO, 2003)

No caso de elementos atirantados (que operam a base de tração) e vigas esbeltas, destaca-se que essas fissuras podem se apresentar verticais com ramificação ao longo das fibras mais tracionadas onde se localizam as armaduras longitudinais. Isso ocorre pela alteração da distribuição de tensões e a absorção por parte do aço, tendendo a reduzir seu grau de abertura. A Figura 19 apresenta este caso. (THOMAZ, 2021)

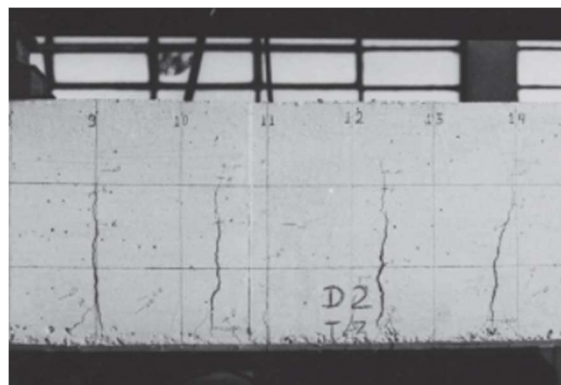


Figura 19: Ramificação de fissuras por absorção de esforços da armadura de tração em vigas esbeltas (THOMAZ, 2021)

Para os esforços de cisalhamento, o rompimento se dá pelo modelo de treliça de Mörsch, em que ocorrem zonas de esmagamento do concreto, resultando em fissuras inclinadas em torno de 45° mais próximas dos apoios. Para as vigas mais esbeltas, esse valor pode variar entre 30° e 60° em função da maior altura para redistribuição dos esforços. A Figura 20 e Figura 21 apresentam os principais modelos de fissuras destacados. (RIPPER; SOUZA, 2009) (THOMAZ, 2021) (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015) (ABNT, 2023)

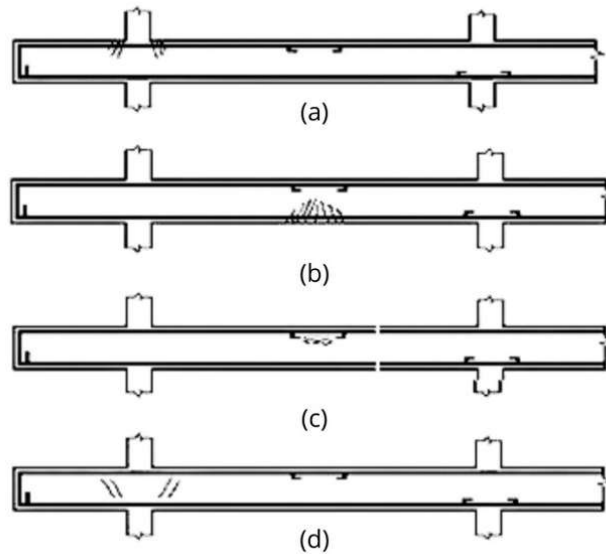


Figura 20: Fissuras típicas em vigas: ruptura do concreto por tração (a e b); esmagamento do concreto por esforço de compressão (c) e fissuras de cisalhamento na região dos apoios (d) (RIPPER; SOUZA, 2009)

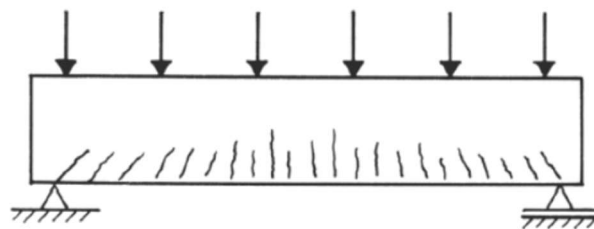


Figura 21: Fissuras típicas de uma viga por esforços combinados de tração e cisalhamento (THOMAZ, 2021)

No caso das torções, o elemento tende ao movimento de rotação em torno do seu eixo longitudinal. Assim, esforços de cisalhamento são gerados continuamente em todas as faces, em formato helicoidal próximo aos apoios. Devido a esse comportamento, as faces opostas da viga apresentam trincas em direções opostas. O fenômeno é gerado principalmente por deformações excessivas em lajes vinculadas ao elemento. A seguir, a Figura 22 ilustra as fissuras por torção. (RIPPER; SOUZA, 2009) (THOMAZ, 2021) (SOUZA; MEDALHO, 2015)

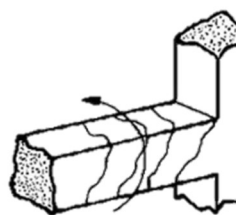


Figura 22: Fissuras de torção (RIPPER; SOUZA, 2009)

4.3.4.3. *Fissuras em Pilares e Consoles*

As aberturas em pilares são mais críticas que nos demais elementos, por serem majoritariamente comprimidos e por apresentarem rupturas frágeis – sem aviso. No caso do esmagamento do concreto por esforços de compressão (caso raro e preocupante) o topo e base dos pilares apresentam sinais da ruptura. Nesses casos, recomenda-se o escoramento da área até que um profissional técnico avalie a situação. (THOMAZ, 2021) (SOUZA; MEDALHO, 2015) (SOLLERO; SANTOS, 2015)

Nos demais casos de fissuramento, geralmente são associados à deficiência de armadura contra a tensão de cisalhamento. Os esforços de flexo-compressão criam microfissuras no concreto armado na interface entre a matriz cimentícia e o agregado graúdo. Nesse momento, atua a armadura de estribos para absorver os esforços impedindo a progressão do fenômeno e, em sua ausência, essas aberturas se intensificam apresentando como características trincas verticais superficiais ao longo do corpo do pilar. A Figura 23 apresenta esse fenômeno. (THOMAZ, 2021)

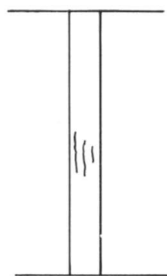


Figura 23: Fissuras por ausência de estribos em pilares (THOMAZ, 2021)

Também devido aos esforços de flexo-compressão ou flambagem da peça, pode haver aberturas horizontais ou levemente inclinadas na região central do pilar. A origem pode se dar desde cálculos subdimensionados de parâmetros de flambagem do elemento como também de desaprumos e deslocamentos de armaduras longitudinais. (THOMAZ, 2021) (SOUZA; MEDALHO, 2015)

Outro caso que pode ocorrer é o assentamento plástico do concreto. No concreto em estado fresco, a tendência é a de se assentar sobre as camadas inferiores. Os estribos em pilares funcionam como uma barreira a essa movimentação da massa, criando tensões internas diferenciais que rompem o concreto na região das barras. Esse fenômeno apresenta aberturas que seguem na mesma região do aço que restringiu o movimento e comprometem a durabilidade da peça devido à perda de

aderência resultante. A Figura 24 e a Figura 25 apresentam os esquemas dessa abertura. (THOMAZ, 2021) (RIPPER; SOUZA, 2009)

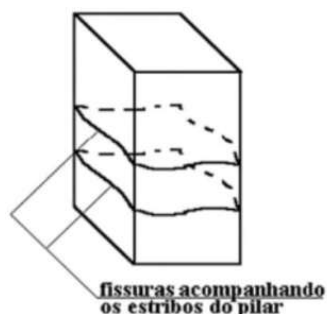


Figura 24: Fissuras por assentamento plástico do concreto em pilares (RIPPER; SOUZA, 2009)

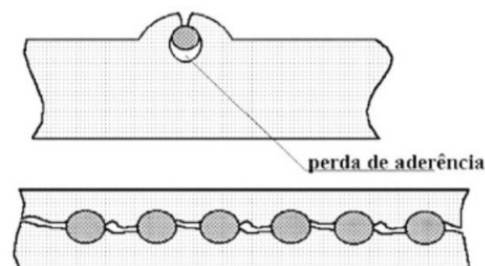


Figura 25: Mecanismos de perda de aderência por assentamento plástico em barras de concreto armado (RIPPER; SOUZA, 2009)

4.3.5. ABERTURAS POR RECALQUES DIFERENCIAIS DE FUNDAÇÕES

As fundações são infraestruturas cruciais para a construção, pois transferem os esforços da superestrutura para o solo. O dimensionamento dessas peças exige a compreensão das complexas características do solo, que são sistematizadas pela Mecânica dos Solos através de modelos matemáticos. As fundações podem ser apoiadas em diferentes materiais, como Rochas, Solos Granulares (cuja resistência se baseia no atrito dos grãos, como pedregulhos e areias grossas) ou Solos Finos (onde o comportamento é altamente influenciado pela presença de água, como argilas e siltes). (PINTO, 2006) (THOMAZ, 2021) (MILITITSKY; SCHNAID, 2015) (VITÓRIO, 2003)

A classificação das fundações é definida pelo modo de transferência de esforços: diretas (ou rasas) distribuem as cargas por tensão de contato nas primeiras camadas do solo, sendo representadas por sapatas, blocos e radiers. As fundações indiretas (ou profundas) encontram resistência em camadas mais profundas, transferindo esforços por atrito lateral e resistência de ponta. As principais são estacas e tubulões. Em fundações com estacas, utilizam-se blocos de coroamento para uniformizar as tensões no topo das estacas. (MILITITSKY; SCHNAID, 2015) (THOMAZ, 2021) (RIPPER; SOUZA, 2009) (VITÓRIO, 2003)

Independentemente do tipo de fundação, o recalque é um movimento natural esperado do solo. Esse fenômeno decorre da redução de volume em um solo gerada por carregamento vertical, resultado do adensamento (expulsão da água dos poros por pressão). O recalque é um movimento natural esperado (compressibilidade), que pode levar anos para se estabilizar, sendo mais lento

em solos argilosos. O projetista deve verificar se esses movimentos podem causar danos, como fissuras. Os recalques são medidos por: Recalques Absolutos (δ) (deslocamento vertical de um ponto); Recalques Diferenciais (δ_s) (variação de deslocamento entre dois pontos, o mais crítico para fissuramento); Distorção Angular; Deflexão (Δ) e Inclinação (ω) (rotação global da edificação). (PINTO, 2006) (MILITITSKY; SCHNAID, 2015)

A origem do recalque é complexa, variando conforme a vida útil da fundação e o tipo de solo. Solos compressíveis (argilosos) apresentam deformação gradual por adensamento; já os solos colapsíveis são mais críticos, pois resistem a esforços quando secos e têm redução brusca de volume ao contato com a água, "colapsando".

Fundações em aterro também não são incentivadas devido à falta de confiabilidade dos métodos executivos e de modelos teóricos, podendo levar a deformações excessivas se houver má compactação. As ações de vizinhança interferem nos bulbos de tensão das fundações, incluindo escavações, rebaixamento de lençóis freáticos (aumentando tensões efetivas) e vibrações (tráfego ou maquinário, afetando solos granulares). (MILITITSKY; SCHNAID, 2015) (VITÓRIO, 2003)

Falhas de projeto e a ausência de investigações geotécnicas adequadas também resultam em recalques devido à heterogeneidade do solo (bolsões de argilas, matacões, variação de lençol freático). Em zonas cársticas (rochas calcárias), a dissolução de carbonatos por águas ácidas cria bolsões de vazio no terreno, o que, sob sobrecargas, pode levar ao aprofundamento localizado do solo, gerando fissurações generalizadas e até colapso estrutural. (LOGEAIS, 1982 *apud* MILITITSKY; SCHNAID, 2015) (VITÓRIO, 2003) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

4.3.5.1. Influência dos recalques no fissuramento de superestruturas

O recalque absoluto não é o protagonista no surgimento de fissuras: se o recalque diferencial for próximo de zero, ocorre apenas o rebaixamento uniforme da estrutura (como em obras na Cidade do México devido à extração de água). Para o surgimento de trincas, o recalque diferencial deve ser considerável, forçando a superestrutura a assumir uma distribuição de tensões não prevista em projeto. Esses esforços internos, ao ultrapassarem a capacidade resistente dos materiais, levam a falhas. (MILITITSKY; SCHNAID, 2015) (THOMAZ, 2021)

Os padrões de aberturas por recalque se dão por cisalhamento, flexão e torção. O rompimento mais comum é por cisalhamento, no qual o movimento diferencial gera esforços cisalhantes nos apoios, promovendo tensões excessivas de tração diagonal. A estrutura, ao se deformar, impõe

momentos fletores em lajes e vigas, que se curvam e fissuram as regiões tracionadas por flexão. Uma característica diagnóstica comum é que as aberturas se propagam apontando a direção de onde ocorreu o recalque. (MILITITSKY; SCHNAID, 2015) (THOMAZ, 2021) (RIPPER; SOUZA, 2009)

4.4. RETRAÇÃO E RAA

4.4.1. RETRAÇÃO DE ELEMENTOS CIMENTÍCIOS

A retração é a redução volumétrica de peças à base de cimento, que pode durar de 2 a 3 anos, sendo mais intensa nas primeiras 48 horas. Ela se divide em diversos tipos, com mecanismos físicos e químicos, sendo eles: (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009) (THOMAZ, 2021) (GENTIL, 2011 *apud* RIPPER; CUSTÓDIO, 2009)

- **Retração Autógena:** Ocorre durante a hidratação do cimento (formação de $Ca(OH)_2$ e C-S-H). Há geração de tensões internas e contração volumétrica porque os produtos têm massa total inferior à dos agentes. Em concretos de alta resistência com baixa relação água/cimento, a ausência de água nos poros gera tensão superficial e retração;
- **Retração por Carbonatação:** O processo de carbonatação transforma o hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio e água livre. O sal gerado possui volume menor que o hidróxido, o que promove uma retração química por gerar tensões superficiais nos poros. Esta é uma das retrações de maior prazo, sendo o fenômeno mais crítico pela despassivação das armaduras do que pela retração em si;
- **Retração Plástica:** Ocorre no estado fresco. A água exsudada migra para a superfície. Se a taxa de evaporação (por fatores ambientais) for maior que a de exsudação, a água da superfície não é repostada, gerando tensões superficiais e causando a retração plástica. É crítica nas primeiras horas e sua perda de água de hidratação interfere diretamente na resistência final do concreto;
- **Retração por Assentamento Plástico:** Ocorre no estado fresco (antes da cura). A força da gravidade faz os materiais pesados se deslocarem para o fundo (assentamento), e como as armaduras são obstáculos rígidos, podem surgir fissuras que geralmente acompanham o alinhamento longitudinal das barras de aço.

4.4.1.1. *Manifestações Patológicas das Retrações*

As retrações geram esforços que potencializam a fissuração tanto em concretos como argamassas. Nos elementos estruturais com configuração de pórtico rígido, as retrações induzem a reações de

flexão nos pilares, resultando em aberturas nas regiões tracionadas como ilustrado na Figura 26. (THOMAZ, 2021) (RIPPER; SOUZA, 2009)

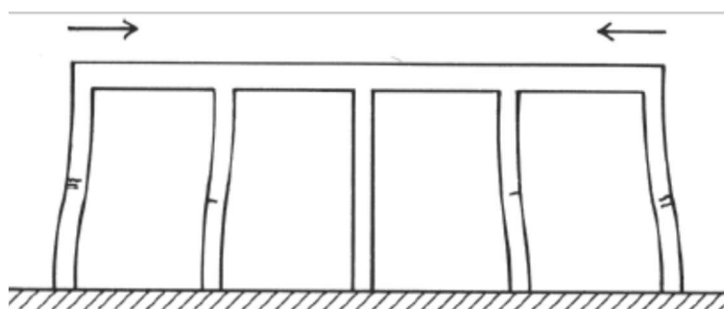


Figura 26: Fissuras de retração em pilares de pórticos rígidos (THOMAZ, 2021)

Nas vigas, a incidência é mais recorrente em regiões com ausência de armaduras para o combate dos esforços gerados. Assim, no contexto das vigas esbeltas, o fenômeno ocorre no terço médio da viga. De modo geral, as aberturas ocorrem dependendo da rigidez do pórtico de travamento, da taxa de aço e distribuição das armaduras. As trincas em vigas se dão por aberturas em todo o contorno da alma, paralelas entre si e concentradas nas regiões do apoio, que restringem o movimento da peça conforme o modelo da Figura 27. (RIPPER; SOUZA, 2009) (THOMAZ, 2021) (SOUZA; MEDALHO, 2015) (PFEIL, 1988)

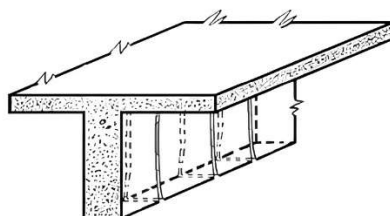


Figura 27: Padrão típico de fissuras por retração em vigas de concreto armado (RIPPER; SOUZA, 2009)

Uma configuração característica em revestimentos argamassados que também pode ocorrer em concreto é a das fissuras mapeadas. Devido à alta relação água/cimento, grande parte da água não é utilizada na hidratação, promovendo esforços durante a evaporação praticamente aleatórios ao longo da superfície do material em cenários de elevadas temperaturas e cura mal executada. (RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (THOMAZ, 2021)

Destaca-se ainda que em regiões de enfraquecimento da seção transversal, com presença de furos e aberturas, há uma tendência de surgimento das fissuras localizadas, podendo uma causa ser a retração. A Figura 28 ilustra o fissuramento de uma região enfraquecida de uma viga. (RIPPER; SOUZA, 2009) (ABNT, 2023) (THOMAZ, 2021)



Figura 28: Fissuração por recalque em seção enfraquecida por furo (THOMAZ, 2021)

Nas lajes, especialmente aquelas travadas em todo seu contorno, os esforços de flexão gerados pela retração podem causar danos aos revestimentos e ao próprio elemento. Como esses painéis são armados, esses esforços gerados são diferenciais nas regiões com ou sem armadura. Em situações críticas, podem surgir fissuras nos contrapisos e até mesmo o destacamento de pisos cerâmicos. Na própria laje, as aberturas apresentam um comportamento mapeado regular (Figura 29). Ademais, em estruturas apoiadas em parede, as reações ao processo podem promover trincas nessa região, com destaque para as regiões enfraquecidas por aberturas. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009) (THOMAZ, 2021)



Figura 29: Modelo de fissuração típico de lajes por recalque (RIPPER; SOUZA, 2009)

Nas argamassas, o comportamento das fissuras também é mapeado. Na região com sintomas de anomalias por retração, apresenta-se uma menor aderência superficial ao substrato que nas demais regiões, podendo resultar no deslocamento do reboco. (RIPPER; SOUZA, 2009) (THOMAZ, 2021) (VITORIO, 2003)

A retração também é uma das principais causas de perda de aderência entre o aço e o concreto, o que compromete a durabilidade da edificação. Isso ocorre porque a distribuição de esforços do

concreto para as armaduras é reduzida, fazendo com que o conjunto estrutural perca sua eficiência. A fissuração por perda de aderência se apresenta de forma inclinada em 45° , de maneira semelhante às fissuras por cisalhamento observadas no item 4.3.4.2. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009) (THOMAZ, 2021)

4.4.2. REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA)

As Reações Álcali-Agregado (RAA) ocorrem pela reação da sílica presente nos agregados com os álcalis (sódio e potássio) da matriz cimentícia, sendo sua descoberta datada das décadas de 1930 e 1940. No Brasil, foram formalmente reconhecidas com a ABNT NBR 15577:2008 (atualmente 15577:2018). O estudo da reatividade é indispensável, pois a sílica é um componente básico da crosta terrestre. A reatividade dos minerais está ligada às estruturas amorfas dos agregados, que apresentam grande área de superfície atômica em comparação às estruturas cristalinas. O principal problema das RAA é a produção de compostos expansivos nos poros do concreto, que incrementam pressões internas resultando em rupturas e fissuramento generalizado. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009) (VITÓRIO, 2003) (ABNT, 2018) (MEHTA; MONTEIRO, 2010)

O mecanismo da RAA é subdividido em Reação Álcali-Sílica (RAS) (que engloba a Álcali-Silicato) e Reação Álcali-Carbonato (RAC). A RAS ocorre devido ao alto pH (12 a 14) do concreto. A sílica (SiO_2) reage com a hidroxila (OH^-), formando ânions de Silício e Oxigênio que, na presença de cátions dos hidróxidos (principalmente do $Ca(OH)_2$), formam um gel de caráter expansivo. A RAS é intensificada em agregados com sílica de formação amorfa. Para mitigação, é recomendado o uso de pozolanas ou a redução do teor de álcalis do cimento. Já a RAC (Álcali-Dolomítica) ocorre em rochas carbonáticas por meio da desdolomitização (decomposição química) da dolomita ($CaMgCO_3)_2$). Esta reação forma Brucita $Mg(OH)_2$ e Carbonato de Cálcio, minerais expansivos. Os hidróxidos são regenerados, atuando como catalisadores. A única recomendação, neste caso, é a redução do teor de álcalis do cimento. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (VITÓRIO, 2003) (MEHTA; MONTEIRO, 2010) (RIPPER; SOUZA, 2009) (ABNT, 2023) (THOMAZ, 2021)

As RAA se manifestam na presença de alta umidade, agregados reativos e alta concentração de álcalis. As anomalias são mais comuns em fundações e elementos em contato com o solo. As aberturas são mapeadas e evoluem para fissuras longitudinais, rodeadas de fissuras menores. As RAA comprometem a durabilidade das estruturas, pois as aberturas expõem as barras à corrosão

e enfraquecem o agregado. A Figura 30 ilustra o processo de fissuramento em questão. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009) (THOMAZ, 2021)



Figura 30: Bloco de fundação com fissuras por RAA (GOMES e OLIVEIRA, 2009 *apud* THOMAZ, 2021)

4.5. ÁGUA E A ESTRUTURA

A água é indispensável para o concreto armado. Ela permite a hidratação dos compostos do cimento, garante a aderência na interface entre o agregado e a matriz, e confere resistência ao material. Ademais, contribui para criar um meio alcalino que protege as armaduras da corrosão (abordado no Tópico 4.2). Essas são apenas algumas das funções relevantes do fluido na durabilidade das construções. Embora seja essencial, a água também pode gerar efeitos deletérios nos elementos da obra, seja ativamente como causa principal ou indiretamente, permitindo a degradação por outros mecanismos. (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015) (RIPPER; SOUZA, 2009) (VITÓRIO, 2003) (ABNT, 2013) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

4.5.1. EFLORESCÊNCIAS E CRIPTOFLORESCÊNCIAS: AS MANIFESTAÇÕES DA LIXIVIAÇÃO

A porosidade no concreto é um fator intrínseco, com espaços vazios formados por água livre não utilizada na mistura, condições de manuseio, transporte e lançamento, incorporação de ar e retração durante a pega. A capilaridade correlaciona o grau de conectividade entre esses vazios: quanto maior o índice, mais conectados estão os espaços. Fluidos presentes no ambiente conseguem percolar por esses caminhos, carreando os álcalis do concreto, como o Hidróxido de Cálcio (solúvel em água), para fora do elemento. (RIPPER; SOUZA, 2009) (VITÓRIO, 2003) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

Esse carregamento de íons de sais iônicos é denominado *lixiviação*, um mecanismo químico de degradação que prejudica a alcalinidade do meio, possibilitando a corrosão eletroquímica das armaduras. A dissolução de compostos também aumenta o número de vazios da estrutura, intensificando a percolação de fluidos. Para o concreto simples, o efeito deletério é a longo prazo, reduzindo a resistência com o progressivo aumento da porosidade. Quando a água percola ao longo dos capilares e evapora na superfície, os sais dissociados precipitam e se solidificam em manchas geralmente brancas e pulverulentas, manifestação denominada *eflorescência*. A Figura 31 e Figura 32 apresentam o fenômeno. (RIPPER; SOUZA, 2009) (VITÓRIO, 2003) (THOMAZ, 1979 *apud* VITÓRIO, 2003) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)



Figura 31: Eflorescência por processo de lixiviação em parede fissura com mofo (Acervo Próprio, 2025)



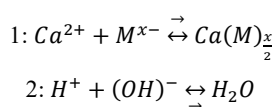
Figura 32: Eflorescências em estrutura de concreto (3H Impermeabilização, 2020)

No entanto, caso a evaporação seja acelerada, a perda de água precipita precocemente os sólidos dissolvidos no interior do elemento. Como esse processo geralmente é de caráter expansivo, geram-se tensões que podem levar à formação de fissuras e deslocamento do material; a esse fenômeno se denomina *criptoflorescência*. Quando a lixiviação ocorre em peças elevadas, a água se desloca por gravidade. Se as gotículas de água se deslocam para o exterior e evaporam durante a queda, o acúmulo de sais no piso gera estruturas cônicas invertidas denominadas *estalagmites*. Caso a água evapore antes do gotejamento, o acúmulo dos sais na eflorescência forma estruturas em forma de cone de sentido oposto, denominadas *estalactites*. Ambos os fenômenos são agravantes do processo de carregamento de compostos do concreto e ocorrem com maior presença de compostos cálcicos no material. (MEHTA; MONTEIRO, 2010) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009) (ENAP, 2023)

4.5.1.1. *Os ácidos e a lixiviação*

A presença de compostos ácidos na água potencializa a lixiviação. Isso ocorre porque o Hidróxido de Cálcio reage com o ácido em uma reação de neutralização. O composto ácido, ao se dissociar,

aumenta a concentração de íons H^+ do meio, deslocando o equilíbrio das reações químicas e favorecendo a dissolução dos alcalinos presentes. O aumento dos cátions de hidrogênio desloca a reação 2 a favor da produção de água. Para repor o OH^- , mais Hidróxido de Cálcio é solubilizado, e o aumento de íons cálcio desloca a reação para a produção de um sal de cálcio. Esses fenômenos ocorrem durante a movimentação de água no interior do elemento, carreando os sais formados. Em alguns casos, o composto gerado é insolúvel, resultando em criptoflorescências no concreto. Os fenômenos são ilustrados pelas reações abaixo: (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009)



Sendo M um ânion genérico de ácido dissolvido na água.

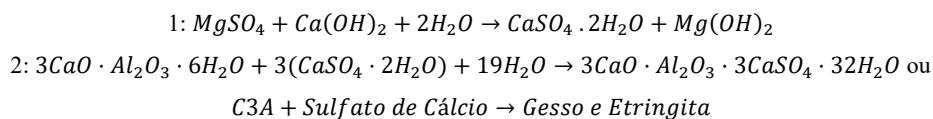
Esse princípio justifica a classificação de ambientes industriais e grandes centros urbanos como agressivos. Efluentes industriais de caráter ácido, chuvas ácidas e gás carbônico intensificam a deterioração do concreto armado e a lixiviação. No contexto da carbonatação, embora os sais gerados possam colmatar os poros (reduzindo a percolação de água), o processo também despassiva a camada protetora das armaduras, o que intensifica a corrosão e compromete a integridade da estrutura. (ABNT, 2023) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009)

4.5.2. SULFATOS E O CONCRETO

Os sulfatos são os principais agentes agressores do concreto, encontrados em ácidos, bases, solos ou águas contaminadas. Sua presença promove interação com os aluminatos tricálcicos (C3A) formando a etringita, um material cerca de 2,5 vezes maior que seu reagente. A formação de etringita no concreto já endurecido gera tensões de tração que levam à fissuração. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (VITÓRIO, 2003) (RIPPER; SOUZA, 2009)

Quando o sulfato é o sulfato de magnésio ($MgSO_4$), o mecanismo se agrava. O sal interage primeiro com o Hidróxido de Cálcio da matriz, formando Sulfato de Cálcio (Reação 1). O Hidróxido de Magnésio ($Mg(OH)_2$) formado é insolúvel, comprometendo a alcalinidade do meio e contribuindo para a corrosão das armaduras. O ataque por sulfatos promove ainda a redução da coesão e resistência do concreto, devido à perda de massa e lixiviação que se desenvolvem junto

com a etringita. As reações químicas que participam do processo são apresentadas abaixo: (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009)



Se os sulfatos estiverem contaminando o agregado ou o cimento, pode ocorrer a etringita tardia, promovendo fissuração sem agente agressor externo, devido à umidade, gradiente térmico elevados e concentração de sulfato liberado pela cura. Um agravante é o ataque ao Silicato de C\u00e1lcio Hidratado (C-S-H), o principal aglomerante do concreto, que leva à formação de taumasita em condições específicas (presença de carbonato, sílica, sulfato e umidade), fazendo o concreto perder coesão e transformar-se em uma massa pastosa. Para mitigar o fenômeno, usam-se cimentos resistentes a sulfatos (tipo RS), com teor reduzido de C3A, e se recomenda a redução da umidade do ambiente. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009)

4.5.3. BIODETERIORAÇÃO: ATAQUE BIOLÓGICOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

A Biodeterioração é o processo no qual a atuação de seres vivos tem efeitos deletérios na estrutura. As condições ideais para a proliferação dos organismos são umidade elevada, ciclos longos de molhagem e secagem, e baixa insolação. O potencial de dano é alto, e as patologias raramente ocorrem sozinhas, sendo frequentemente negligenciadas devido à falta de familiaridade dos profissionais com o tema. (RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (THOMAZ, 2021) (VITÓRIO, 2003)

As bactérias e fungos são os principais agentes deletérios no concreto, proliferando em galerias de águas pluviais, esgotos domésticos e superfícies com umidade e matéria orgânica. O ataque é principalmente químico: os microrganismos produzem ácidos em suas atividades metabólicas, reduzindo o pH e promovendo a deterioração do concreto e a despassivação das armaduras. A comunidade microbiana também retém umidade na superfície. Um exemplo clássico é o Ataque por ácidos sulfúricos biogênicos em manilhas de esgoto, onde bactérias transformam compostos à base de enxofre em ácidos fortes. Fungos (mofos) também representam um risco para a saúde da população (alergias, infecções), afetando o desempenho de habitabilidade da edificação.

(RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (GENTIL, 2011 *apud* RIPPER; CUSTÓDIO, 2009)

Há ainda o crescimento de plantas (em vigas baldrame e calçadas) que promove tensões de tração que induzem a fissuração do material. Essas aberturas permitem a entrada de agentes agressivos no interior do concreto. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009) (VITÓRIO, 2003) (ABNT, 2024)

Os mecanismos de degradação oriundos da fauna são muito pluralizados devido à grande quantidade de espécies e comportamentos dos seres. No geral, podem ser destacados os seguintes processos deletérios: (RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

- Ataques químicos: Urina e fezes de animais (como suínos e aves, devido ao ácido úrico) possuem alta concentração de ácidos que comprometem a alcalinidade do concreto e desencadeiam a corrosão.
- Desgaste mecânico: Desgaste e cargas de impacto não previstas em regiões de manejo de animais de grande porte.
- Dano estrutural indireto: Animais subterrâneos (como tatus) podem fazer escavações que facilitam a erosão do solo suporte de fundações, podendo provocar recalques na infraestrutura.

4.6. DESGASTE SUPERFICIAL

O desgaste superficial do concreto está intrinsecamente ligado a mecanismos de deterioração físicos, consistindo na perda de matéria por interação com agentes externos sólidos ou carreados por fluidos. Essa patologia tem origem em quatro fenômenos principais: Atrito (resistência ao movimento por fricção); Abrasão (desgaste por atrito de materiais mais duros); Erosão (deterioração por fluxo contínuo de fluido); e Percussão (desgaste por vibrações ou choques). A degradação, que pode ocorrer simultaneamente ou separada, invariavelmente leva à perda de seção do elemento estrutural. Em casos críticos, a redução de material pode expor as armaduras, iniciando o processo de corrosão e comprometendo a integridade do concreto armado. (RIPPER; SOUZA, 2009) (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

4.6.1. EROSÃO E ABRASÃO DE CONCRETOS

A Erosão é um fenômeno físico de deterioração, geralmente causada pelos efeitos abrasivos da alta pressão da água ou pelo carreamento de materiais sólidos (detritos), sendo mais proeminente em ambientes hídricos (pontes, barragens). Seu agravante é a manifestação localizada, podendo levar ao colapso de obras, sendo a erosão de pontes classificada em generalizada, de contração e localizada (fossas). A cavitação, gerada pelo turbilhonamento da água, forma bolhas de vapor/ar que, ao se chocarem com a estrutura, promovem degradação mecânica superficial e potencializam os efeitos erosivos. O desgaste por erosão/abrasão pode ser potencializado por ataques químicos adjacentes (como lixiviação), levando à degradação completa da camada de cobrimento e expondo as armaduras. (RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (PFEIL, 1988) (VITÓRIO, 2015)

A Figura 33 mostra o colapso estrutural da ponte sobre a Represa do Rio Capivari-Cachoeira, na BR 116/PR em 2005. A causa do acidente foi a ruptura do acesso da ponte. Essa estrutura não apresentava manutenções periódicas ou drenagem adequada, além de processos erosivos intensos. (CENACID, 2005)



Figura 33 (A e B): Desabamento da Ponte sobre a Represa do Rio Capivari (CENACID, 2005)

4.6.2. ATRITO E ABRASÃO EM CONCRETOS

O Atrito é a força motriz para a Abrasão, que é o dano resultante da baixa resistência superficial do concreto em comparação com o material em contato. O desgaste abrasivo, principal foco de danos, pode ser subdividido em: Abrasão de dois corpos (dano aplicado diretamente, como atracamento de embarcações) ou Abrasão três corpos (o material que gera o dano está na

superfície e um terceiro corpo, como o tráfego de maquinário, funciona apenas como motriz dessas partículas abrasivas). (RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (ZUCOLOTO, 2016)

4.6.3. PERCUSSÃO EM CONCRETOS

A Percussão ocorre por um impacto, atuando como uma solicitação brusca que gera elevadas vibrações e cargas mecânicas. O dano depende da magnitude da força e da resistência do concreto. Em casos amenos, a degradação limita-se a mossas e fissuras radiais superficiais, mas em casos graves, pode levar à ruptura. Os impactos são classificados como de corpo rígido (mais localizado e profundo) ou mole (deforma-se no impacto, distribuindo a carga e limitando o dano à superfície). A Percussão, diferente dos outros agentes, apresenta falha instantânea, enquanto os demais demandam de um efeito de médio a longo prazo. Elementos com alto risco de impacto (como pilares de estacionamento) recebem carga adicional no dimensionamento (fator de impacto), garantindo que, no Estado Limite Último (ELU), não ocorra a ruína ou perfuração integral. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009) (LEET; UANG; GILBERT, 2009) (ABNT, 2023) (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015)

4.7. ALTERAÇÃO DE USO E FALHAS DE PROJETO/EXECUÇÃO

A análise de falhas de projeto é complexa. O processo da construção civil, diferentemente das demais indústrias, apresenta um caráter mais individual em seus produtos. Embora busque o uso de processos, padronização e controle de qualidade, a especificidade de cada obra deve ser levada em consideração e o resultado se torna um conjunto de fatores variáveis e de controle dificultado quando comparado a uma esteira produtiva. O projeto se torna a primeira defesa para garantir a qualidade de um empreendimento. Desse modo, desde a concepção da estrutura, do anteprojeto, até o projeto básico e executivo, ele orientará todos os preceitos e fundamentos para a execução adequada. (RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

No entanto, quando o projeto apresenta deficiências em sua constituição, os erros aparecem ou durante a execução (em que se torna impossível realizar o processo conforme estipulado) ou são de mais difícil detecção, apresentando-se apenas com o uso da edificação e o surgimento das anomalias. Em uma análise ampla, quanto mais cedo o erro ocorre, mais complexa será sua resolução. Isso significa que um erro de modelagem estrutural se torna mais crítico que um erro de detalhamento final. (RIPPER; SOUZA, 2009)

Assim, os erros mais difíceis de se resolver são os de lançamento e modelagem estrutural. Essas falhas resultam no encarecimento do processo produtivo do empreendimento. Enquanto isso, inconsistências de projeto executivo tendem a emergir como manifestações patológicas ao longo da vida útil do produto. Destacam-se como principais falhas: (RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

- Modelagem e lançamento inadequados: uma solução incoerente com o uso da edificação, concepção inadequada de apoios dos elementos estruturais, análise de cargas incorreta, dentre outros;
- Falta de compatibilização dos projetos complementares e arquitetônicos: incompatibilidades observadas durante a execução levam a atrasos significativos e revisão de projetos que podem levar a uma interpretação confusa e erros por parte da mão de obra;
- Especificação inadequada de materiais: destaca-se o uso de materiais em desacordo com as condições da estrutura, como o uso de tintas internas em fachadas, diâmetros incorretos de tubulações e sistemas de drenagem, dentre outros. É relevante notar que a qualidade dos materiais e o controle de recebimento praticamente inexistente em grande parte dos empreendimentos também geram sintomas patológicos;
- Detalhamento insuficiente ou errado: Detalhamentos inexistentes a serem resolvidos em obra são uma das principais recorrências, com muitos erros sendo gerados por faltas de informações em projeto. A culpa recai então na qualidade de mão de obra, no entanto, a falta de informações no projeto leva a essa tomada de decisão inadequada. Destaca-se ainda a presença de detalhes em escalas inadequadas, dificultando ou até mesmo impedindo os operários e mestre de obras de interpretar o desenho. As principais especificidades que causam problemas em obras são o posicionamento, comprimento e caracterização de armaduras, como em escadas, lajes em desnível e consoles. A ausência de detalhamentos construtivos, como pingadeiras de juntas de dilatação também contribuem para a redução da vida útil do sistema. A Figura 34 apresenta exemplos de inconsistências estruturais no detalhamento executivo.

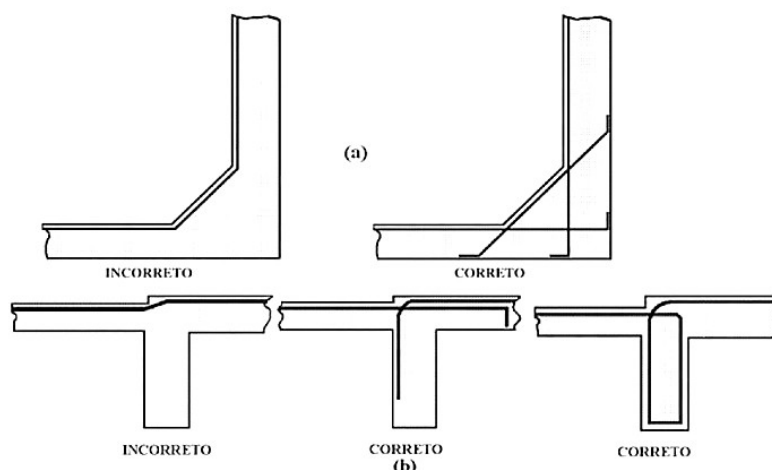


Figura 34: Exemplos de inconsistências em detalhamentos de armaduras. (a) incoerência na armação de encontros de elementos estruturais. (b) incoerência na armação de lajes em desnível

- Falta de padronização das representações: um exemplo principal disso são as dimensões de escala. Em um mesmo projeto, considera-se ideal a adoção de escalas em uma mesma unidade. Projetos com unidades em centímetros, metros e milímetros simultaneamente podem levar a uma interpretação incorreta e até mesmo a locações de estruturas inadequadas no canteiro, comprometendo todo o sistema estrutural concebido;
- Erros de dimensionamento: como o grande foco se encontra na ruptura (Estado Limite Último), a falta das verificações de Estado Limite de Serviço (como flechas excessivas, vibração e limites de fissuração) pode levar ao surgimento de anomalias no futuro. Destacam-se as fissuras e trincas que, mesmo que não levem à ruptura da edificação, geram desconforto ao usuário. Há ainda a tomada de cargas incorreta que leva a um superdimensionamento ou subdimensionamento, ambos críticos;
- Inadequação com o ambiente: considerações normativas de estruturas preveem limites em função da condição climática e localização da obra. Isso se aplica para cobrimentos de elementos estruturais, análise de cargas variáveis (vento, gelo, neve, sismos, temperatura etc.) entre outras. A incoerência entre limites normativos e região do empreendimento pode fragilizar a estrutura perante um ambiente agressivo, intensificando processos como a corrosão de armaduras;
- Interpretação incorreta ou falta de dados: nesse caso, destacam-se as falhas de análise da interação solo-estrutura, com falhas no processo de estudos preliminares como falhas ou falta de sondagens geotécnicas.

Há ainda os erros durante a fase de execução. No contexto nacional, a mão de obra da construção civil é majoritariamente informal ou com qualidade técnica insuficiente. Segundo a Fundação Getúlio Vargas (2024), 71,2% das empresas da construção civil apresentaram dificuldades em

contratar trabalhadores. A rotatividade das contratações também é um cenário negativo ao setor, sendo soluções adotadas pelas empresas a capacitação dos funcionários e aumento de salários na tentativa de tornar atrativa a permanência e competitividade comercial. (CASTELO, VIANA, SILVA; 2024) (RIPPER; SOUZA, 2009)

Assim, interpreta-se o cenário do setor como crítico em relação à mão de obra, quadro que se agrava diante da falta de condições adequadas de trabalho, da ausência de treinamentos para capacitação e da inexistência de um controle de qualidade efetivo em grande parte dos empreendimentos. Essa combinação de variáveis leva a erros durante a execução que podem passar despercebidos e se manifestar como manifestações patológicas posteriormente. (RIPPER; SOUZA, 2009)

Uma característica comum da construção civil é o controle rígido de prazos. Devido a isso, as construções tendem a se iniciar prematuramente, antes de finalizados os controles de compatibilização e alterações necessárias aos projetos. Assim, modificações são comuns ao longo da etapa construtiva, aumentando a dificuldade dos processos e a má gestão dos projetos. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009)

4.8. INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS

As inspeções em estruturas são uma ferramenta da área de Patologia das Construções que objetiva constatar as reais condições de uma estrutura ao longo de sua vida útil. Esse mecanismo de perícia é essencial para garantir a VUP da edificação, bem como sua qualidade e segurança para o usuário, permitindo um planejamento de intervenções e recuperações necessárias para que a obra se mantenha íntegra. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009)

Assim, quanto mais complexa e relevante é a estrutura para seu contexto, mais detalhadas e periódicas se tornam as vistorias, visto que a intervenção precoce de uma manifestação patológica é significativamente menos onerosa do que o seu tratamento após o seu desenvolvimento em longo prazo. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009)

Destaca-se que as inspeções analisam desde as origens até os mecanismos de atuação das anomalias, propostas de intervenção, consequências e então o diagnóstico final no formato de um laudo técnico. Assim, o profissional responsável pela perícia não possui apenas um foco visual, mas sim, segue uma atividade sistemática e metódica, de acordo com as normativas vigentes e sua experiência profissional, para a avaliação completa da integridade da estrutura. A relevância deste trabalho vai além da identificação e categorização de manifestações patológicas, atingindo

o cenário econômico (pela redução da onerosidade do processo com a manutenção preventiva), social (pela integridade de estruturas de uso e bem comum da comunidade), ambiental (pela sustentabilidade e otimização do uso de recursos) dentre tantas outras esferas sobre as quais a Engenharia Civil influencia. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009)

A respeito das normativas que regem esse profissional no cenário nacional, destacam-se:

- ABNT NBR 13752:2024: Perícias de Engenharia na Construção Civil
 - Disserta sobre as diretrizes, conceitos, critérios e procedimentos das perícias na área de Engenharia civil;
- ABNT NBR 16747:2020: Inspeção Predial – Diretrizes, conceitos, terminologia e procedimento
 - Estabelece os requisitos para avaliar as condições de uso, manutenção, operação e integridade das edificações;
- ABNT NBR 5674:2024: Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção
 - Referência para o histórico e plano de manutenções do objeto periciado;
- ABNT NBR 9452:2023: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto e de aço – Procedimento
 - Disserta sobre os parâmetros, requisitos e tipos de inspeções no contexto das Obras de Arte Especiais (OAE), devido a sua grande relevância.

4.8.1. INSPEÇÕES DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS

As Obras de Arte Especiais (OAE) são nomeadas dessa forma devido a sua característica singular de projeto e alto investimento inicial, sendo essencial que a sua durabilidade e vida útil sejam condizentes com tal investimento. No Brasil, embora não esteja diretamente especificada nas normativas vigentes, a vida útil de projeto mínima de uma OAE recomendada é de pelo menos 50 anos. (ABNT, 2023) (IBRACON, 2016) (RIPPER; SOUZA, 2009)

No geral, classificam-se como OAE estruturas como pontes, pontilhões, viadutos, passagem superior, passagem inferior e passarelas. De modo sucinto, essas estruturas têm em comum o objetivo de vencer obstáculos e dar continuidade à travessia da via. O que as diferencia é justamente o tipo de obstáculo e de transeunte: se o obstáculo constitui um canal aquífero, tem-se uma ponte, do contrário, apresenta-se um viaduto para veículos ou uma passarela para pedestres e ciclistas. O pontilhão então é determinado como uma ponte ou viaduto com comprimento

inferior a 6 metros. Enquanto isso, as passagens permitem o cruzamento em níveis distintos de vias, permitindo a continuidade de fluxo em ambas. (ABNT, 2023) (PFEIL, 1988)

Uma OAE apresenta sua estrutura com 3 distinções com base em sua posição, sendo elas: (ABNT, 2023) (PFEIL, 1988)

- Superestrutura: contempla o tabuleiro da estrutura, que recebe diretamente as cargas permanentes e acidentais da via para transferir para a mesoestrutura (quando existente) ou diretamente à infraestrutura. É constituída por lajes, longarinas, transversinas, estais, treliças, dentre outros.
- Mesoestrutura: Conjunto de elementos intermediários que fazem a conexão da transferência de cargas entre superestrutura e infraestrutura. Pode ser contemplada por pilares, aparelhos de apoio, vigas de travessa e vigas de travamento;
- Infraestrutura: responsável por fazer a transferência final de esforços ao solo substrato. Contempla as vigas alavancas, elementos de fundações (sapatas, tubulões estacas), blocos superficiais e de transição.

Dessa forma, devido a sua relevância no contexto do transporte nacional, da sua importância social e onerosidade do processo executivo, as inspeções em OAE apresentam um rigor superior ao de edifícios. Isso também se deve ao fato de receberem cargas dinâmicas e possíveis impactos de veículos e acidentes, levando a um risco maior de incidência de anomalias. Assim, a normativa ABNT NBR 9452:2023 apresenta as principais diretrizes, métodos e sistemas de classificação para essas vistorias, com o rigor devido ao porte da estrutura. (RIPPER; SOUZA, 2009) (ABNT, 2023)

De modo geral, o processo da investigação é semelhante ao de inspeções prediais, com o levantamento das documentações, anamnese, vistorias, ensaios e laudos técnicos. Ademais, como o controle, em tese, é mais contínuo, o acesso às informações pode ser facilitado em virtude do porte da obra e de sua gestão pública. (ABNT, 2023) (ABNT, 2020) (RIPPER; SOUZA, 2009)

A principal diferença entre as Inspeções em OAE e as Inspeções Prediais reside nos parâmetros analisados, nos sistemas de pontuação determinados por norma e nos tipos de documentação e vistorias. Assim, as OAE podem ser vistoriadas por meio dos seguintes processos: (ABNT, 2023)

- Inspeção cadastral: uma inspeção de liberação, seja para a inauguração do elemento como após reformas de melhorias ou reforços estruturais requisitados;
- Inspeção rotineira: inspeção de acompanhamento periódico não superior a um ou dois anos dependendo do tipo de obra. Nela devem ser vistoriados os elementos da superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura aparentes;

- Inspeção Especial: com uma periodicidade de 5 a 8 anos, essa vistoria apresenta um grau de detalhamento superior à rotineira, sendo obrigatoriamente realizada por um profissional técnico responsável com experiência. Devem ser mapeadas todas as anomalias e o diagnóstico com procedimentos de intervenção para restaurar as condições ideais da OAE. Nessa etapa, são comuns os usos de ensaios como forma comprobatória e devem ser analisadas todas as características e elementos da estrutura;
- Inspeção extraordinária: ocorre em situações especiais, como acidentes, impactos, incêndios ou um critério de avaliação anterior que requiere maior atenção. Nesse caso, apresenta-se um relatório específico e comumente são utilizados equipamentos especiais para avaliar os parâmetros das obras.

A ABNT NBR 9452:2023 orienta os profissionais também quanto aos parâmetros que devem ser analisados nas inspeções: estrutural, funcional e de durabilidade. Basicamente, entende-se por parâmetro estrutural aquele que analisa as condições autoportantes da estrutura, verificando os Estados Limites de Serviço do construto, sendo considerado prioritário em relação aos demais. Já no quesito funcional, avalia-se o grau de satisfação, conforto e segurança para o usuário da OAE, avaliando requisitos geométricos da via como qualidade dos acessórios de segurança (guarda-corpo, ausência de buracos na pista, correta sinalização etc.). Quanto a durabilidade, considera-se a análise da Vida Útil Residual da obra, avaliando o tempo estimado que a estrutura deve cumprir adequadamente as condições impostas a ela. Ressalta-se nesses parâmetros que, caso o nível de serviço de uma OAE se eleve, inspeções cadastrais devem garantir a adequação ao novo conjunto de cargas presentes. (ABNT, 2023) (VITÓRIO, 2003)

Nessas vistorias, o engenheiro responsável avalia os parâmetros conforme notas de 1 a 5, sendo 1 a situação mais crítica e 5 o cenário ideal. Há casos em que as condições da OAE se apresentam tão críticas e comprometidas que pode ser utilizada a nota 0 para demonstrar a gravidade do problema. Os elementos avaliados também apresentam uma hierarquia bem definida, podendo ser divididos em: (ABNT, 2023)

- Elemento Principal (P): dano pode causar o colapso estrutural da obra;
- Elemento Secundário (S): dano pode levar a um colapso localizado;
- Elemento Complementar (C): dano não compromete a estrutura da OAE, mas apenas sua funcionalidade.

A ABNT NBR 9452:2023 apresenta em seu Anexo E uma tabela com a caracterização dos elementos estruturais quanto a sua relevância no sistema. A tabela pode ser consultada neste trabalho no ANEXO A.

Assim, a gestão da manutenção se inicia com a finalização da inspeção e a apresentação do laudo técnico, que difere para cada tipo de vistoria executada. Dependendo das notas atribuídas a cada sistema, cabe ao gestor avaliar as decisões imediatas e o plano de intervenção conforme diagnóstico apresentado em laudo. Atualmente, há como inovação o uso da tecnologia BIM (Building Information Modeling) para assessorar o processo, com a criação de modelos comparativos ao longo do ciclo de vida da estrutura. As notas de classificação para cada condição verificada podem ser observadas no ANEXO B extraídas do Anexo E da ABNT NBR 9452:2023. (ABNT, 2023)

4.8.2. LAUDO TÉCNICO: INFORMAÇÕES E CRITÉRIOS

O laudo técnico é o documento final de uma inspeção, sendo o resultado de todo o processo de investigação e propostas de intervenção, um diagnóstico completo e detalhado do objeto analisado. Por ser um material profissional, é imprescindível que apresente a emissão de uma Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) ou Registro de Responsabilidade Técnica (RRT) do profissional responsável, pois, sem ela, a documentação perde seu valor legal e comercial. De caráter técnico, linguagem formal e objetiva, o laudo deve ser detalhado nos pontos essenciais, e o uso de registros fotográficos e mapeamentos das anomalias serve como respaldo. É importante justificar os métodos, teorias e o tratamento para as irregularidades, pois é a partir deste laudo que se inicia um novo plano de gestão de manutenção, determinando ações prioritárias e destinação de recursos para retomar a qualidade, durabilidade, usabilidade e desempenho do construto. Os principais tipos de laudos técnicos são o Predial, o de Obras de Arte Especiais e o Pericial. (ABNT, 2024) (ABNT, 2020) (VITÓRIO, 2003) (RIPPER; SOUZA, 2009)

4.8.2.1. *Laudo de OAE (ABNT NBR 9452:2023)*

No caso das obras de arte especiais, devido ao grau de detalhamento requisitado nas vistorias, o documento varia consideravelmente em função do tipo de inspeção que foi realizada. Na inspeção cadastral, a etapa inicial compreende o adequado registro de todos os documentos de projeto e execução disponíveis, destacando-se: (ABNT, 2023)

- Dados do projeto (desenhos, memoriais, serviços e materiais);
- Registro de execução da OAE (alterações do tipo *as built* devem ser destacadas, bem como materiais utilizados e ensaios utilizados);
- Termo de Recebimento;

- Registro de inspeções anteriores (nos casos de a inspeção cadastral ser de uma reforma, reforço ou outra alteração);
- Registro de monitoramento da estrutura (nos casos de a inspeção cadastral ser de uma reforma, reforço ou outra alteração);
- Registros de alterações e modificações de projeto e utilização (alargamentos, reforços reparos etc.).

No caso do cadastro, deve-se seguir a ficha cadastral presente no Anexo A da ABNT NBR 9452:2023, que compreende informações como: (ABNT, 2023)

- Identificação e localização;
- Características da estrutura (dimensões, tipologia, vãos e apoios);
- Características Funcionais (relevo, tipo e características da pista, gabaritos, tráfego);
- Registro de manifestações patológicas – quando houver (determinar a localização, elemento estrutural afetado);
- Características do ambiente (Classe de Agressividade ambiental conforme ABNT NBR 6118; caracterização do curso de água – se houver);
- Observações e registros fotográficos;
- Classificação da OAE conforme sistemas de notas para os três parâmetros.

Para as inspeções rotineiras, consideram-se as informações do Anexo B da ABNT NBR 9452:2023, contemplando as seguintes informações: (ABNT, 2023)

- Introdução com informações de localização e da tipologia estrutural;
- Registro de anomalias observadas acompanhadas de registros fotográficos;
- Classificação da OAE conforme os parâmetros de notas;
- Comentários gerais quanto a alterações ocorridas no estado da estrutura em comparação com a vistoria anterior.

No caso das inspeções especiais, as informações estão contidas nos anexos D, F e H da ABNT NBR 9452:2023, a depender do tipo de estrutura e condições de acesso. No geral, neste tipo de inspeção, devem ser documentados: (ABNT, 2023)

- Introdução com informações de localização e tipologia estrutural;
- Procedimentos realizados durante a inspeção bem como ensaios com respaldo normativo;
- Registro de anomalias acompanhadas de registro fotográfico;
- Investigação por meio de Ensaios não destrutivos;
- Diagnóstico e mapeamento das anomalias observadas;
- Considerações e observações pertinentes do profissional responsável pela vistoria.

Destaca-se que, devido a sua relevância, a norma recomenda a escrita de diversos relatórios com estas informações, sendo eles o de Patologias, de Terapia e Projetos de Reparo e Técnicos Complementares (memoriais de cálculo, estudos hidráulicos, geotécnicos etc.). (ABNT, 2023)

4.9. ENSAIOS DE INVESTIGAÇÃO

Em inspeções, o diagnóstico correto das anomalias deve ser embasado em ensaios que confirmem a hipótese mais provável. Esses testes são classificados em destrutivos (DE), que interferem diretamente no uso da estrutura; semidestrutivos (SD), que causam perturbação insignificante; e não destrutivos (ND), que não causam danos. Há preferência inicial por ensaios ND devido ao menor custo e impacto. (ABNT, 2020) (ABNT, 2024) (VITÓRIO, 2003) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

4.9.1. ENSAIOS PARA QUALIDADE E RESISTÊNCIA

- **Extração de Testemunhos e Resistência à Compressão (SE):** Realizado para verificar a qualidade do concreto em relação ao projeto. Consiste na extração de corpos de prova cilíndricos com sondas rotativas, submetidos à ensaio de ruptura por compressão conforme Figura 35; (RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)
- **Ensaio de Esclerometria (ND):** Utiliza um esclerômetro (martelo de rebote) para medir a dureza superficial do concreto, indicando sua qualidade e homogeneidade. É um teste não destrutivo que visa estimar indiretamente a resistência à compressão. Requer preparo superficial e múltiplos testes na mesma face conforme Figura 37 a; (VITÓRIO, 2003) (RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)
- **Ultrassom – Velocidade do Pulso Eletrônico (ND):** Permite verificar vazios por falhas de concretagem e a profundidade de fissuras. A velocidade de propagação das ondas varia com a densidade do meio, e o ensaio é frequentemente usado em conjunto com a esclerometria para estimar a resistência conforme Figura 37 b; (RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)
- **Prova de Carga Estática:** Consiste na aplicação gradual de carga sobre o elemento estrutural, com monitoramento de deformações e fissuras. Visa verificar o comportamento da estrutura sob cargas reais, sendo critério final para aceitação da estrutura (atendimento às condições de Estado Limite). (RIPPER; SOUZA, 2009)

4.9.2. ENSAIOS PARA MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS QUÍMICAS

- **Teste de Carbonatação com Fenolftaleína (SD):** Verifica a perda de alcalinidade do concreto (carbonatação). O rompimento de um pedaço do concreto permite a aspersão da solução de fenolftaleína: a coloração rosa/vermelho carmim indica $\text{pH} > 9$ (passivação), enquanto a coloração incolor indica pH acidificado ($\text{pH} < 8,2$) e perda da proteção conforme Figura 37 c; (RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)
- **Monitoramento do Potencial de Corrosão e Resistividade (ND):** Através da medição de diferenças de potencial elétrico e resistividade do concreto com um voltímetro de alta impedância, permite identificar zonas de corrosão ativa das armaduras antes dos sinais visíveis. Zonas negativas são mapeadas como de alta probabilidade de corrosão conforme Figura 37 e; (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)
- **Presença de Cloretos (SD ou DE):** Observa a concentração de íons cloreto pela reação com nitrato de prata (AgNO_3), formando um precipitado branco. A análise laboratorial permite determinar a concentração de íons em diferentes profundidades, gerando o perfil de penetração; (RIPPER; SOUZA, 2009) (VITÓRIO, 2003)
- **Análise Petrográfica do Concreto:** Ensaio laboratorial avançado que analisa microscopicamente fatias de testemunhos para investigar a microestrutura e composição. Permite diagnosticar patologias químicas como Reação Alcalia-Agregado (RAA) e ataques por sulfatos, além de avaliar a qualidade da pasta e a microfissuração conforme Figura 36. (RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)

4.9.3. ENSAIOS DE INSPEÇÃO E REPARO

- **Pacometria (ND):** Utiliza um pacômetro (leitor de campo magnético) para detectar a presença de barras de aço, determinando a localização exata das armaduras, estimando o diâmetro nominal e a espessura do cobrimento. É fundamental para guiar a extração de testemunhos e inspecionar obras sem documentação, conforme Figura 37 e; (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019)
- **Passividade de Fissuras:** Determina se uma fissura é ativa ou passiva através da selagem de um corte de vidro fino sobre ela. Se o vidro se fragmentar no período de teste (7 a 15 dias), a fissura é ativa (ainda em movimento); se o vidro se mantiver estável, é tratada como passiva. (RIPPER; SOUZA, 2009)



Figura 35: Extração de testemunho de concreto (LORENZI, 2019)



Figura 36: Imagem de ensaio petrográfico (ÁVILA; THOMAS; DA SILVA, 2025)



(a) Ensaio de Esclerometria



(c) Ensaio de carbonatação com fenolftaleína



(b) Ensaio de Ultrassom



(d) Ensaio de Pacometria



(e) Ensaio de Potencial de Corrosão

Figura 37: Ensaios de Engenharia Diagnóstica (GP ENGENHARIA, 2022)

4.10. TERAPIA PARA AS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

O campo da Patologia das Construções estuda meios de intervir diretamente nas numerosas e complexas manifestações patológicas das edificações para tratar a origem e garantir a erradicação do problema. É fundamental a correta interpretação e sensibilidade do engenheiro responsável, pois o diagnóstico errado resulta em custos e efetividade nula, tornando a experiência um fator relevante. Para a terapia das manifestações patológicas de concreto armado, utilizam-se abordagens clássicas e inovações do mercado nacional. Deve-se ressaltar que algumas anomalias, por serem intrínsecas do material, como as Reações Álcali-Agregado (RAA), podem envolver apenas ações mitigadoras, e não terapias efetivas para o problema em si. A Tabela 5 apresenta algumas terapias para o âmbito das OAE (RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009)

Tabela 5: Terapias para as manifestações patológicas em OAE

Manifestação Patológica	Provável Origem/Mecanismo	Tipo de Intervenção	Técnica de Terapia	Materiais Empregados	Procedimento Executivo (Resumo)
Trincas em mapa com exsudação de gel	Reação Álcali-Agregado (RAA)	Mitigação (Controle)	Tratamento de Superfície (Hidrofugação) e Lítio	Silanos, Siloxanos (base solvente) ou Nitrato de Lítio	1. Limpeza profunda da superfície. 2. Injeção de trincas > 0,3mm (vedação). 3. Aplicação de hidrofugante ou lítio (impede expansão do gel). 4. Monitoramento contínuo.
Corrosão generalizada em pilares (Zona de Maré)	Ataque por Cloretos (Ambiente Marinho)	Proteção	Proteção Catódica	Anodos de Titânio/MMO, Retificador de Corrente	1. Reparo físico do concreto. 2. Instalação de malha de anodos (titânio) na superfície. 3. Conexão ao retificador de corrente. 4. Aplicação de sobrecapa de argamassa.
Corrosão severa localizada	Contaminação por Cloretos	Reparo / Proteção	Proteção Catódica Galvânica	Anodos de sacrifício (Zinco) e argamassa de reparo	1. Reparo convencional da área degradada. 2. Instalação de anodos de sacrifício conectados à armadura dentro do reparo. 3. Fechamento com argamassa de alta resistividade.
Desgaste superficial / Erosão	Abrasão hidráulica ou mecânica	Reparo	Recomposição com Concreto Projetado	Concreto projetado (via seca ou úmida) com fibras	1. Hidrojateamento de alta pressão (remoção de concreto deteriorado). 2. Instalação de tela eletrosoldada. 3. Projeção do concreto em camadas. 4. Acabamento com hidrofugante.
Insuficiência de carga axial (Pilares)	Aumento de carga ou degradação	Reforço (Confinamento)	Envoltório com Fibra de Vidro (GFRP) ou Carbono	Tecidos de fibra de vidro/carbono e resina	1. Regularização da superfície. 2. Aplicação de primer. 3. Enrolamento da manta em espiral (confinamento). 4. Pintura de proteção UV.

Tabela 6: Terapias para as manifestações patológicas em OAE (Continuação)

Manifestação Patológica	Provável Origem/Mecanismo	Tipo de Intervenção	Técnica de Terapia	Materiais Empregados	Procedimento Executivo (Resumo)
Insuficiência de carga à flexão (Vigas)	Aumento de trem-tipo (Carga móvel)	Reforço	Protensão Exterior	Cordoalhas de aço engraxadas, Blocos de ancoragem	1. Execução dos blocos de ancoragem e desviadores. 2. Instalação das cordoalhas externas. 3. Protensão dos cabos com macacos. 4. Proteção dos componentes.
Lixiviação (Estalactites sob o tabuleiro)	Percolação de água por fissuras	Reparo / Proteção	Injeção e Impermeabilização do Tabuleiro	Resina de Poliuretano (PU) Hidroativo e Manta Asfáltica	1. Injeção de PU nas fissuras (para estancar fluxo ativo). 2. Remoção do pavimento asfáltico. 3. Restauração da impermeabilização superior. 4. Repavimentação.
Juntas de dilatação danificadas	Tráfego intenso, envelhecimento	Substituição	Troca da Junta de Dilatação	Juntas elásticas ou Juntas de perfil metálico	1. Demolição do berço da junta antiga. 2. Regularização do nicho com graute de alta resistência. 3. Fixação da nova junta. 4. Transição com o pavimento.
Erosão junto aos encontros (Cabeceiras)	Falha de drenagem pluvial	Recuperação	Estabilização de Talude e Drenagem	Gabiões, Enrocamento ou Concreto	1. Limpeza e recomposição do aterro. 2. Execução de descidas d'água (escadas hidráulicas). 3. Proteção superficial do talude (pedra ou concreto).
Baixa capacidade de carga (Vigas/Pilares)	Erro de projeto, Mudança de uso	Reforço	Colagem de Manta de Fibra de Carbono (CFRP)	Manta de carbono e Resina epóxi estrutural	1. Preparo do substrato (lixamento). 2. Arredondamento dos cantos vivos (raio $\geq 2,5$ cm). 3. Aplicação de primer e adesivo. 4. Colagem da manta.

Fonte: RIPPER; CUSTÓDIO, 2009 e IBRACON, 2016

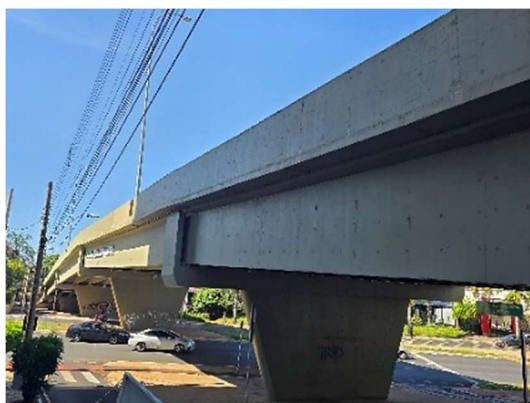
5. ESTUDO DE CASO: VIADUTO DE UBERLÂNDIA – MG

O viaduto em questão se trata de um dos que cruzam a principal via do município de Uberlândia-MG, a Avenida Rondon Pacheco. Fazendo a conexão entre os bairros 1 e 2, a estrutura foi inaugurada em meados de 2022 e, com menos de cinco anos de uso, apresenta anomalias severas que motivaram sua escolha para ser tratado neste estudo de caso.

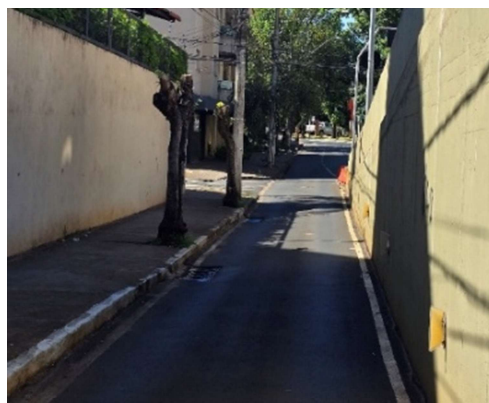
O viaduto apresenta quatro vias de tráfego, sendo duas em cada sentido, conforme pode ser observado na Figura 38. Considerando seus acessos, apresenta em torno de 210 metros de extensão, com estrutura em concreto armado do tipo em vigas, constituído por:

- 7 vigas longarinas com 6 apoios longitudinalmente;
- Transversinas de travamento;
- Pilares;
- Aparelhos de apoio de Neoprene fretado;
- Guarda-corpos pré-moldados de aproximadamente 1,00 m de altura;
- Pistas de rolamento em asfalto.

O acesso do viaduto em ambos os lados se dá por aterros teoricamente compactados isolados nas laterais por muros de ala de concreto. Em suas laterais, observam-se duas vias de acesso à mesma avenida da estrutura, configurando uma passagem estreita. A Figura 38 (a-d) apresenta vistas da estrutura e entorno.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 38: Vistas do viaduto: vista inclinada - a; via de acesso - b; pistas de rolamento - c; vigas longarinas – d (AUTOR)

Conforme observado na vista inclinada, o viaduto é formado pela conformidade de trechos retos que formam sete rampas, sendo duas formadas pelo acesso com aterro e cinco ao longo do vão propriamente dito. Em projeto, observa-se os valores como referências de distância e inclinação apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Valores de projeto de inclinação e comprimento dos trechos do viaduto

Indicador	Distância de Projeto [m]	Inclinação [%]	Observação
R1	18,91	2,760%	Rampa de acesso do Bairro 1
R2	31,46	5,360%	
R3	28,77	3,650%	
R4	30,77	-3,870%	
R5	29,54	-6,650%	
R6	29,72	-7,740%	
R7	41,03	-7,320%	Rampa de acesso do Bairro 2

Fonte: AUTOR

5.1. CONDIÇÕES DE TRÁFEGO

Conforme a classificação viária do município de Uberlândia-MG (ANEXOS 11 e 12), a avenida correspondente ao viaduto é do tipo coletora com código V2 e P1. Assim sendo, a Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo recomenda velocidade máxima de 40 km/h, com largura podendo variar de 2,7 a 3,5 metros. (UBERLÂNDIA, 2022) (SÃO PAULO, 2020)

Segundo este código, o viaduto atende ao limite de velocidade e largura mínima. Destaca-se, no entanto, que, com ausência de um controlador de velocidade (como um radar eletrônico), a passagem dos veículos nas rampas de declividade é consideravelmente maior que a

regulamentada na sinalização. Contudo, não foi realizado nenhum estudo quantitativo a respeito da velocidade de passagem dos veículos na via.

5.2. ANÁLISE DAS PATOLOGIAS DO VIADUTO

Para um viaduto de idade tão recente, a quantidade de manifestações patológicas observadas nos elementos estruturais da superestrutura é significativa, afetando diretamente a durabilidade e condições de segurança estrutural. Caso não ocorram intervenções e monitoramento em um curto período, a VUP condicionada em 50 anos será inviável de ser alcançada. A seguir, apresentam-se as principais patologias em cada elemento estrutural.

5.2.1. VIGAS LONGARINAS

As principais patologias observadas nas vigas foram a formação de flechas na estrutura e formação de fissuras de esforço cortante na proximidade dos apoios. Devido à dificuldade de acesso, a observação das deformações foi apenas realizada qualitativamente, conforme observado na Figura 39 (na qual as deformações são perceptíveis pela curvatura da sinalização horizontal e dos guarda-corpos), enquanto as aberturas foram determinadas quantitativamente no apoio das vigas próximo ao acesso do aterro, no início e final dos elementos estruturais.



Figura 39: Abaulamento das pistas de rolamento na Rampa 7 devido a flechas excessivas das vigas longarinas (AUTOR)

Para a análise das vigas, determinou-se as faces esquerda e direita de cada uma (mostrado na Figura 40) para, com o auxílio de um fissurômetro observar o valor das aberturas analisadas. As Tabela 7 e Tabela 8 apresentam os valores obtidos e a Figura 41 (a-b) ilustram as medições realizadas.



Figura 40: Referenciais adotados para estudo do viaduto (AUTOR)

Tabela 7: Grau de Abertura das fissuras no apoio do Bairro 1

Identificador	Face	Grau de abertura [mm]	Características
V1	Esquerda	0,05	Inclinadas em 45°
	Direita	0,05	
V2	Esquerda	0,4	
	Direita	0,05	
V3	Esquerda	0,3	
	Direita	0,15	
V4	Esquerda	0,15	
	Direita	0,25	
V5	Esquerda	0,05	
	Direita	0,15	
V6	Esquerda	0,25	
	Direita	0,35	
V7	Esquerda	0,2	
	Direita	0,25	

Fonte: AUTOR

Tabela 8: Grau de Abertura das fissuras no apoio do Bairro 2

Identificador	Face	Grau de abertura [mm]	Características
V1	Esquerda	0,35	Inclinadas em 45°
	Direita	0,25	
V2	Esquerda	0,2	
	Direita	0,3	
V3	Esquerda	0,4	
	Direita	0,4	
V4	Esquerda	0,2	

Identificador	Face	Grau de abertura [mm]	Características
V5	Direita	0,2	
	Esquerda	0,3	
	Direita	0,25	
V6	Esquerda	0,15	
	Direita	0,4	
V7	Esquerda	0,2	
	Direita	0,15	

Fonte: AUTOR



(a)



(b)

Figura 41: Verificação de aberturas com auxílio de fissurômetro nas vigas longitudinais V2 e V6 (AUTOR)

Conforme verificado na ABNT NBR 6118:2014, norma vigente quando realizado o projeto, o limite de abertura de fissuras para uma Classe de Agressividade Ambiental II como a do município de Uberlândia, de ambiente urbano, é de 0,3 mm, ultrapassado nas vigas V2 e V6 (apoio bairro 1) e nas vigas V1, V3 e V6 (apoio bairro 2).

5.2.2. ANÁLISE, TRATAMENTO E INTERVENÇÃO

Como as fissuras apresentam comportamento de 45° em relação aos apoios, se propagando principalmente nas extremidades das vigas, trata-se de fraturas por esforço cortante. Nesse cenário, observam-se três principais hipóteses para sua origem, sendo elas:

- Subdimensionamento de armadura resistente ao esforço de cortante (A_{sw}) suficiente: Caso a área de aço transversal presente na viga não tenha sido dimensionada adequadamente para resistir à combinação de esforços, ocorre o surgimento das fissuras no rompimento das bielas críticas;

- Execução não condizente ao projeto: caso o espaçamento dos estribos da armadura transversal tenha sido alterado, seja por falhas de interpretação, problemas na fixação, dentre outros; continua faltando área de aço suficiente para combater aos esforços;
- Esforços adicionais provindos pela falta de conformidade dos trechos inclinados: como se observa no tabuleiro do viaduto. Essas falhas geram descontinuidades na passagem dos veículos, promovendo aumento de tensões concentradas e a vibração excessiva nas peças de suporte. Nesse cenário, parte desses esforços configura-se como cisalhamento na região do apoio. Destaca-se ainda a preocupação com o impacto desses ciclos de tensão na fadiga ao longo da vida útil da estrutura.

Assim, para averiguação das condições, recomenda-se inicialmente o ensaio de Pacometria para identificar a posição dos estribos, espaçamentos e bitolas das barras. Outro ensaio que pode ser utilizado é o de Esclerometria para avaliar a resistência indireta ao concreto, verificando f_{ck} da estrutura com o de projeto. Ressalta-se que estas verificações são não destrutivas, fundamentais para validar hipóteses sem causar avarias na estrutura. Deve-se solicitar ao engenheiro projetista o memorial de cálculo para verificar como foi feito o dimensionamento da armadura transversal e a tomada de cargas, a fim de verificar possíveis inconsistências com as normativas vigentes na época.

Para resolução das quinas na região de encontro dos trechos de longarinas, recomenda-se a conformação do pavimento com um recapeamento do tabuleiro. Para isso, retira-se todo o pavimento existente e realiza-se uma nova camada com espessura suficiente para tornar o trajeto dos veículos uniforme ao longo das rampas. Ressalta-se uma preocupação com esta solução para os trechos de vigas que já apresentam flechas excessivas, uma vez que o aumento de espessuras resulta em uma sobrecarga adicional aos elementos. Assim, é necessário avaliar um projeto de reforço estrutural das vigas previamente. O processo de reforço com protensão externa é recomendado ao caso, uma vez que: (RIPPER; SOUZA, 2009) (IBRACON, 2016)

- A protensão permite reduzir a flecha e o grau de abertura das fissuras já existentes;
- Processo rápido, limpo;
- Fácil inspeção e manutenção.

No entanto, o uso deste tipo de reforço pode apresentar um elevado custo inicial pela necessidade de equipe especializada para realizar o serviço. Outro ponto negativo é a redução da proteção das cordoalhas a situações de corrosão ou impactos caso a proteção apresente defeitos.

O encamisamento, processo com o qual há o aumento da seção transversal com incremento de armadura e concreto, não é recomendado para as vigas que apresentem flechas excessivas, uma

vez que ocorrerá o aumento do peso próprio na estrutura e mantém a deformação existente (reforço passivo). (RIPPER; SOUZA, 2009) (IBRACON, 2016)

5.2.3. MUROS DE ALA E ATERRO

As condições dos muros de ala são visualmente as mais precárias. Com fenômenos de lixiviação e carbonatação presentes, ocorre a expansão do concreto e formação de rachaduras significativas em todas as faces dos dois apoios. Destaca-se a presença de junta de dilatação entre o acesso e o vão do viaduto, sendo este o ponto mais provável de início dos processos de fissuração observados. A Figura 42 (a-d) apresenta as condições das contenções observadas. No bairro 1 (a), à esquerda, nota-se que a rachadura se originou da junta, com presença de fissuras radiais, carreamento de sais do concreto e solo. Na região interna da contenção, na junta de controle com o início das rampas no Bairro 1 (b), apresenta-se a lixiviação de sais do concreto, presença de umidade e mofo além da consequente perda da camada de pintura. Na direita do Bairro 2 (c), observou-se ainda o crescimento de plantas e uma mancha de coloração alaranjada. No Bairro 1 (d) à direita, observa-se que a rachadura promoveu o deslocamento transversal da estrutura.

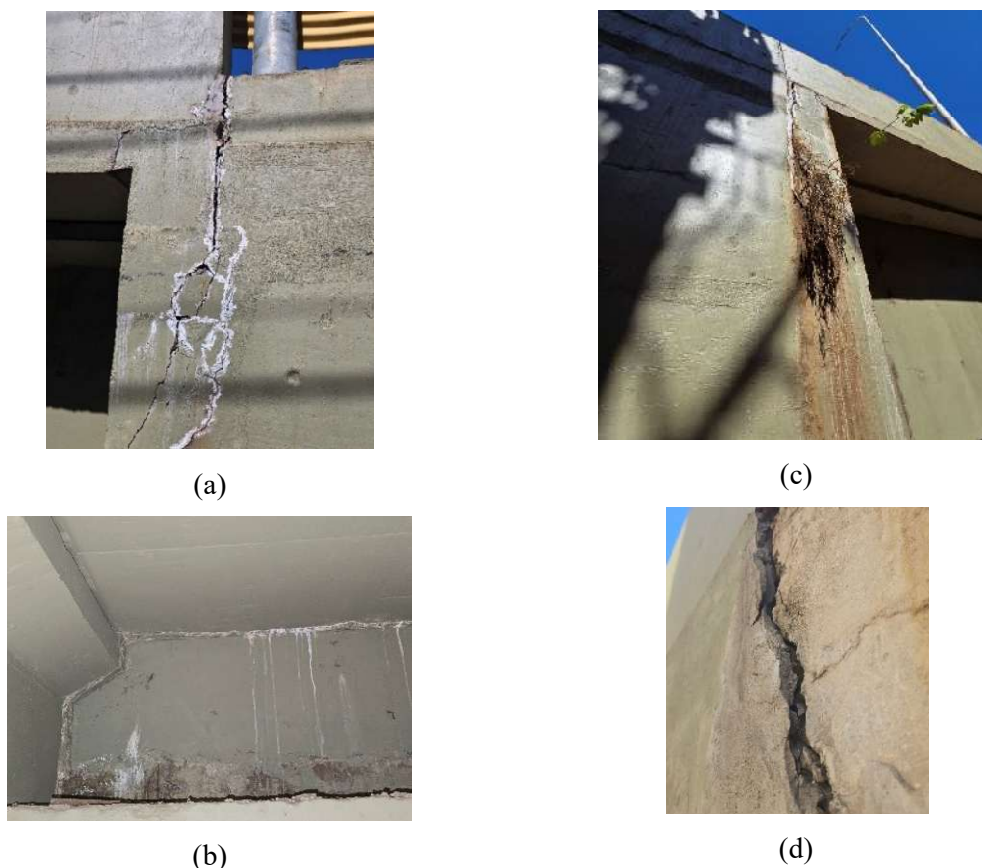


Figura 42: Situação dos muros de ala e contenção do aterramento (AUTOR)

5.2.4. ANÁLISE, TRATAMENTO E INTERVENÇÃO

O concreto dos muros de contenção apresenta a pior condição da estrutura. Como existem rachaduras expressivas principalmente na região de encontro com o vão, recomenda-se o tratamento da área com limpeza, grauteamento dos vazios e preenchimento da junta com um material flexível como mastique de poliuretano. Como em alguns pontos ocorre o surgimento de manchas alaranjadas, necessita-se de verificar a qualidade das armaduras da contenção. Nesse ponto, um primeiro ensaio de verificação deve ser o de resistividade da armadura e do concreto além da carbonatação com fenolftaleína. A resistividade permitirá observar regiões de possível corrosão e a fenolftaleína observar se o concreto na região próxima das barras ainda forma a camada passivadora. Uma vez detectada a anomalia, faz-se necessário limpar a região, remover a oxidação das barras e verificar a condição da seção comprometida caso haja necessidade de reforço. Após a escarificação e limpeza da região e possíveis necessidade de reposição de barras, aplicar um primer ou proteção com um metal de sacrifício e preencher a região com argamassa de alta resistência ou grauteamento. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (HELENE, 1988)

Como se trata de muros de contenção, a situação de degradação do tabuleiro intensifica a entrada de água no aterro. Faz-se necessário então verificar as condições do aterro e de drenagem, haja vista que a pressão hidrostática pode permitir o surgimento ou intensificação das aberturas direta ou indiretamente com a reação expansiva de sais precipitados carregados. Assim, deve ser verificado o projeto de drenagem do viaduto e sua real efetividade. Verificar a condição de impermeabilização do concreto e a qualidade da camada protetora (seja a manta asfáltica, argamassa polimérica, dentre outros). (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (RIPPER; SOUZA, 2009)

Devido à onerosidade do processo, uma investigação local em uma região crítica deve ser realizada para avaliar a extensão dos danos. A escolha dessa região deve ser feita com o mapeamento das fissuras.

A presença de vegetação na estrutura do muro é um sinal crítico de alerta, uma vez que as raízes podem se estender ao longo do aterro, descompactando a região com o apodrecimento da planta. Assim, devem ser eliminados os resquícios biológicos com o uso de herbicidas sistêmicos e remoção completa das raízes. Devem ser usadas argamassas de reparo para o fechamento das fissuras passivas. (RIPPER; SOUZA, 2009) (HELENE, 1988)

Quanto ao processo de lixiviação e precipitação dos sais, deve ser realizada a limpeza das áreas afetadas, a avaliação da qualidade do concreto da região devido a possível perda dos processos erosivos e realizar o grauteamento das áreas escarificadas. Para regiões que requerem apenas o tratamento das aberturas, as fissuras menores que 0,3 mm podem ser tratadas com uso de uma tinta elastomérica e para graus maiores, recomenda-se o preenchimento com resina epóxi. No caso de verificadas fissuras ativas, recomenda-se sanar os problemas e utilizar selante à base de poliuretano para maior flexibilidade. (RIPPER; SOUZA, 2009) (IBRACON, 2016) (HELENE, 1988)

Destaca-se que o principal fator a ser corrigido é a presença de umidade no concreto, logo, adequar o sistema de impermeabilização do aterro atrelado a um sistema de drenagem efetivo são a base para qualquer tratamento a longo prazo.

5.3. PAVIMENTAÇÃO

O pavimento, em uma macroanálise, não apresenta defeitos oriundos do material ou de dimensionamento inadequado. No entanto, como o viaduto apresenta um formato parabólico concordado por trechos retos tangentes (as rampas), a solução adotada para conformação não foi efetiva por não promover uma parábola perfeita, o que resultou em pontos de descontinuidade na pavimentação. Isso ocorre porque a camada de pavimentação não foi capaz de aliviar a passagem de inclinações, de modo que surgiram “quinas” na região de passagem. Essa configuração prejudica consideravelmente a estrutura e o próprio pavimento, visto que o impacto dos veículos gera esforços e vibrações não previstos em projeto. Desse modo, nas regiões de emendas, o pavimento apresenta fissuras expressivas e trincas mapeadas oriundas das vibrações ocasionadas. A Figura 43 (a-b) apresenta trechos nos quais ocorrem esse fenômeno.



(a)



(b)

Figura 43: Aberturas no pavimento asfáltico nas regiões de conformidade das rampas (AUTOR)

5.3.1. ANÁLISE, TRATAMENTO E INTERVENÇÃO

No caso, a qualidade do material em si não é o principal fator de problema, mas sim a espessura adotada e a regularização da superfície. Assim, recomenda-se o recapeamento com a eliminação das inadequações geométricas observadas ao longo dos trechos, que geram desconforto ao usuário e tensões não previstas em projeto. Ressalta-se que, aliado às vibrações geradas, esse fenômeno pode intensificar os ciclos de esforços que promovem a fadiga do material, aumentando o envelhecimento precoce da estrutura.

Como existem trechos apoiados em vigas com deformação excessiva, a regularização da estrutura com uso de, por exemplo, protensão externa deve ser feita antes de tratar a pista de rolamento. Destaca-se ainda a importância de remover a camada anterior de asfalto para melhorar a aderência com a estrutura e reduzir a sobrecarga que será gerada com o aumento da camada de pavimento. Deve-se ainda verificar a altura do guarda-corpo após o processo e garantir a altura livre de pelo menos 80 centímetros. (SÃO PAULO, 2020) (RIPPER; SOUZA, 2009)

5.4. GUARDA-CORPOS DE CONCRETO

Os guarda-corpos observados apresentaram dimensões adequadas para a categoria do viaduto, sendo do tipo pré-moldado, instalados no viaduto. No entanto, observam-se os fenômenos de trincas mapeadas ao longo de todas as faces das peças. Verificou-se ao toque e não foram observadas exsudações de gel na peça. A Figura 44 ilustra as anomalias identificadas.



Figura 44: Fissuras mapeadas nos guarda-corpos (AUTOR)

Há ainda a existência de aberturas mais significativas entre as peças, principalmente nas regiões de conformação das vigas. Na divisa entre elementos, observa-se, nos pontos de pico, um afastamento significativo. A Figura 45 (a-b) ilustra o caso.



(a)



(b)

Figura 45: Aberturas presentes nos guarda-corpos (AUTOR)

5.4.1. ANÁLISE, TRATAMENTO E INTERVENÇÃO

No caso dos elementos nas regiões de formação de aresta no pavimento, as flechas nas vigas deslocaram cada peça do guarda-corpo para um lado, logo, gerando um espaçamento considerável da ordem de centímetros. Assim, resolvendo-se o reforço das longarinas, há uma tendência de retornarem à posição original. Desse modo, essas fissuras e as presentes nas juntas entre peças podem ser tratadas com uso de um selante à base de poliuretano. Em especial, essa abordagem deve ser utilizada como uma prevenção ao retorno da configuração das discontinuidades da pista de rolamento, para prevenir defeitos estéticos e possíveis fissuras por movimentação. (HELENE; TUTIKIAN; BOLINA, 2019) (HELENE, 1988) (IBRACON, 2016)

Outro ponto relevante são as fissuras de retração. Nesse caso, como há incidência de eflorescência nas paredes dos guarda-corpos, recomenda-se a limpeza com jateamento da área com água ou lixamento elétrico. A aplicação pode ser com uso de argamassas poliméricas ou resistentes à retração. Em fissuras mais profundas, pode ser avaliado o uso de resina epóxi. (HELENE, 1988) (RIPPER; SOUZA, 2009)

5.5. ESTRUTURAS SEM PATOLOGIAS OBSERVADAS

Na mesoestrutura não foram observadas patologias ou situações críticas que requerem maior atenção; os pilares se encontram íntegros. As fundações, por estarem ocultas, não foram inspecionadas, no entanto, não foram observadas nos demais elementos condições que tenham origem na infraestrutura.

5.6. CONCLUSÃO

A durabilidade em obras da engenharia civil é um fator essencial para garantir o sucesso de um empreendimento. Embora crucial, este tema foi debatido por muito tempo e apenas recentemente foi consolidado como referência normativa – resultando na ABNT NBR 15575:2013. Esse avanço é um marco para o campo de estudos da Patologia das Construções, promovendo limites e parâmetros a serem seguidos para garantir a Vida Útil de Projeto (VUP) de uma edificação.

Assim, a concepção de projeto, execução e a manutenção por parte de usuários, configuram um conjunto de fatores complexos que garantem a qualidade da construção para o usuário e a comunidade, permitindo conforto, segurança e padrões mínimos de habitabilidade. A conjunção desses fatores apresenta grandes desafios, desde falhas de projeto até negligências do usuário e executor. O resultado disso são as manifestações patológicas recorrentes nas obras, mas o avanço da engenharia e as boas práticas atreladas a inspeções periódicas permitem a avaliação das anomalias, sem prejudicar as condições de VUP.

Como observado na literatura, o binômio projeto-execução representa a maior parte das origens de manifestações patológicas, sendo essencial aprimorar os estudos de compatibilização de projetos e especialização da mão de obra. O estudo de caso abordado neste Trabalho de Conclusão de Curso, por exemplo, demonstra fortes indícios de problemas oriundos justamente destes fatores.

Além das múltiplas origens, a complexidade dos mecanismos de degradação (biológicos, mecânicos, físicos, químicos) e a influência da combinação de fatores fazem com que o trabalho do engenheiro especialista em Patologia das Construções seja de extrema relevância. Sua experiência permite o correto diagnóstico. Afinal, uma manifestação patológica que retorna após a intervenção efetiva não foi solucionada, e evidencia que a proposta foi inadequada.

O viaduto do município de Uberlândia, como exemplo, ilustra essa complexidade: embora se observem diversas manifestações patológicas distintas e com mecanismos de degradação

isolados, verifica-se uma interdependência entre elas, seja em relação à causalidade (uma se torna origem da outra) ou à intensidade (promove a piora das condições observadas). Assim, há fortes indícios de problemas na modelagem do projeto em conjunto com falhas da execução. Essas suspeitas devem ser verificadas conforme os ensaios observados no tópico de estudo do caso.

No caso da estrutura, os principais fatores a serem observados e receberem intervenção são as falhas nas longarinas: resolver as flechas excessivas e monitorar as fissuras de esforço de cortante. Em sequência, verificar qual a situação dos estribos presentes e apontar onde ocorreu a falha para um possível reforço estrutural. Como observado, a protensão externa é o método mais recomendado, por resolver tanto a distribuição de tensões como a deformação já existente. As demais intervenções no tabuleiro (pavimentação, conformação e guarda-corpos) devem ser realizadas apenas após essas investigações e terapias.

Outro fator de destaque são os muros de contenção dos aterros de acesso. O solo é um fator crítico em estruturas principalmente com a presença de umidade, o que permite fenômenos de erosão, lixiviação e sobrepressões. No estudo, a presença de fissuras na região das juntas de dilatação permitiu a entrada de água e a degradação sistêmica das paredes, verificando-se em consequência manchas alaranjadas (possível sinal de corrosão) e precipitação de sais na eflorescência. A situação das rachaduras presentes é agravada ao ponto de apresentar deslocamento de camadas de concreto transversalmente em pontos próximos a região dos encontros e juntas de dilatação.

Destaca-se ainda como fator relevante a inexistência de radares eletrônicos de velocidade. Esses equipamentos permitiriam a redução do impacto dinâmico dos veículos nas arestas formadas no encontro das rampas. Tal controle reduziria as tensões a serem absorvidas pela estrutura e se mostraria um método paliativo para retardar a perda de VUP até a intervenção definitiva na estrutura.

O viaduto, embora com sinais graves de anomalias, não apresenta indícios diretos de iminência de colapso estrutural, mas faz-se necessário o monitoramento da condição das fissuras ativas. Outro fator a ser levado em consideração são as condições estéticas do viaduto, que levantam preocupações da comunidade quanto a sua segurança e afetam o parâmetro funcional da obra.

Este Trabalho de Conclusão de Curso fornece um panorama técnico-teórico-prático da área de Patologia das Estruturas, com enfoque em concreto armado, vida útil de projeto e a importância de se considerar o desempenho desde a concepção do projeto. Desse modo, apresenta para a comunidade da engenharia civil um compilado das principais referências da área e permite, principalmente aos graduandos, uma compreensão da área e de suas vertentes. Como trabalhos

futuros, recomenda-se a modelagem estrutural do viaduto com as cargas reais; a verificação da influência da má conformação dos trechos em rampa na distribuição de esforço; e a execução de ensaios investigativos destacados no trabalho.

REFERÊNCIAS

3H Impermeabilização Cabo Frio RJ - Mantas Asfálticas e Injeção de Resinas. **Eflorescência: Como resolver**. Publicado há 5 anos. Disponível em: <https://3himper.com.br/eflorescencia-como-resolver>. Acesso em: 08 out 2025.

ARAÚJO, J.M. **Curso de concreto armado**. v. 1 a 4. Rio Grande: Dunas, 2014.

ÁVILA, Edson Luiz; THOMAS, Gabriel Allebrandt; DA SILVA, Mauricio Oliveira Righi. Análise petrográfica e microscopia eletrônica de varredura na reação álcalis agregado no concreto. **REVISTA DELOS**, v. 18, n. 73, p. e7004-e7004, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200:2024 — Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16747:2020 — Inspeção predial - Diretrizes, conceitos, terminologia e procedimento**. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1:2013 — Edificações habitacionais — Desempenho — Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-1: Agregados – Reatividade Álcali-Agregado – Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2023 — Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2014 — Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9452:2023 — Inspeção de pontes, viadutos e passarelas — Procedimento**. 5. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 2. v. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BOTELHO, M. H. C. **Resistência dos materiais: para entender e gostar**. 2. ed. São Paulo: Blücher, 2013. 264 p. ISBN 8521207506.

CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução de Sergio Murilo Stamile Soares. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014**. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.

CASTELO, Ana Maria; VIANA, Iuri; SILVA, Hanna Carolin. Escassez de mão de obra eleva custos na construção. **Blog do IBRE – FGV**, 15 jul. 2024. Disponível em: <https://blogdoibre.fgv.br/posts/escassez-de-mao-de-obra-eleva-custos-na-construcao>. Acesso em: Novembro, 2025.

CENACID - Centro de Apoio Científico em Desastres. **Deslizamento e queda de ponte sobre a represa Capivari-Cachoeira, Campina Grande do Sul – PR – 25/01/05**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 25 jan. 2005. Disponível em: <https://cenacid.ufpr.br/missao/deslizamento-e-queda-de-ponte-sobre-a-represa-capivari-cachoeira-campina-grande-do-sul-pr-250105/>. Acesso em: 29 out. 2025.

DUAN, Jintao; QIU, Peiyun; LIU, Jianyong; WU, Xin. **Experimental study of the concrete cracking behavior of an immersed tunnel under fire**. *Buildings*, [S.l.], v. 13, n. 6, p. 1412, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13061412>

ESCOLA NACIONAL DE ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA (ENAP). **Módulo 4: causas químicas**. In: CONCEITOS ESSENCIAIS SOBRE PATOLOGIAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. Brasília: ENAP, 2023. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/jspui/bitstream/1/7815/4/Módulo%204%20-%20Patologia.pdf>. Acesso em: Out 2025.

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

HELENE, Paulo R. L. **Manual prático para reparo e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1988.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. 10. ed. [S. l.]: Pearson, 2019.

IBRACON – INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. *Concreto & Construções*, n. 82, abr.–jun. 2016. São Paulo: IBRACON, 2016. 100 p. Acesso em: ago. 2025.

LORENZI, A. et al. Inspeção de obras através da aplicação de ensaios não destrutivos. In: **XV CONGRESO LATINO-AMERICANO DE PATOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN-XVII CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN**. 2019.

Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. **Cimentos Hidráulicos**. In: *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2ª ed. São Paulo: IBRACON, 2010. Cap. 6.

MILITITSKY, Jarbas; SCHNAID, Fernando. **Patologia das fundações**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MORAES, Ricardo. **Bombeiros descartam a possibilidade de haver sobreviventes aos desabamentos no Rio de Janeiro** [fotografia]. Rio de Janeiro: Reuters, 25 jan. 2012. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/chega-a-17-o-numero-de-corpos-localizados-nos-escombros-do-rio-25462hyyzfeyv72yqzqmdtxe6>. Acesso em: novembro, 2025.

PFEIL, Walter. **Pontes em Concreto Armado**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1983.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RIPPER, T.; SOUZA, V. C. M. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

SÃO PAULO (Município). **Manual de Desenho Urbano e Obras Viárias**. 1. ed. São Paulo: Secretaria Municipal de Mobilidade e Transportes, 2020. Disponível em: https://prefeitura.sp.gov.br/web/gestao/w/portal_do_servidor/manuais_recursos_humanos/10689. Acesso em: Dez. 2025.

SILVA, A. **Engenheiros também erram**. São Paulo: PINI, 2010.

SOLLERO, Marcela B. S.; SANTOS, Rodrigo T. Inspeção e análise de estruturas incendiadas. **Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos**, 13. 2013, Porto Alegre. São Paulo: ABENDI, 2015.

SOUZA, R.; MELHADO, S. **Aprendendo com os erros dos outros**. 6. ed. São Paulo: PINI, 2015.

THOMAZ, Ércio. **Trincas em edifícios**: causas, prevenção e recuperação. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

UBERLÂNDIA (Prefeitura). Secretaria Municipal de Obras. **ANEXO 11 – Classificação Viária do Município**. Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://www.adobe.com/br/acrobat/resources/document-files/pdf-types/pdf-a.html>. Acesso em: Dez. 2025.

UBERLÂNDIA (Prefeitura). Secretaria Municipal de Obras. **ANEXO 16 – Classificação Viária do Município**. Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://www.adobe.com/br/acrobat/resources/document-files/pdf-types/pdf-a.html>. Acesso em: Dez. 2025.

VITÓRIO, Afonso. **Fundamentos da patologia das estruturas nas perícias de engenharia**. Recife: Instituto Pernambucano de Avaliações e Perícias de Engenharia – IPEAPE, 2003.

VITÓRIO, José Afonso Pereira. **Casos de colapsos estruturais em pontes, viadutos e passarelas**. Recife, 12 nov. 2015. 42 p. Seminário sobre Riscos e Acidentes Estruturais em Obras de Engenharia Civil

ANEXO A

CARACTERIZAÇÃO DE RELEVÂNCIA DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS SEGUNDO ABNT NBR 9452: 2023

Elemento	Laje	Duas vigas	Grelha	Caixão	Treliça	Estrutura aporticada
Superestrutura - Viga - Longarina	–	P	P	P	–	P
Superestrutura - Viga - Transversina	S	S	S	S	–	S
Superestrutura - Laje - Superior	P	S	S	P	S	P
Superestrutura - Laje - Inferior	–	–	–	S	–	P
Treliça - Banzo inferior	–	–	–	–	P	–
Treliça - Banzo superior	–	–	–	–	P	–
Treliça - Diagonais	–	–	–	–	P/S	–
Treliça - Montantes	–	–	–	–	P/S	–
Treliça - Contraventamento	–	–	–	–	S	–
Treliça - Longarina	–	–	–	–	P	–
Treliça - Transversina	–	–	–	–	S	–
Treliça - Ligações	–	–	–	–	P	–
Mesoestrutura - Travessas	P	P	P	P	–	
Mesoestrutura - Pilares	P	P	P	P	–	
Mesoestrutura - Aparelhos de apoio	P	P	P	P	–	
Encontros - Cortina	S	S	S	S	–	
Encontros - Laje de transição	S	S	S	S	S	
Encontros - Muros de ala	S	S	S	S	S	
Infraestrutura - Blocos	P	P	P	P	P	
Infraestrutura - Sapatas	P	P	P	P	P	
Infraestrutura - Estacas/Tubulões	P	P	P	P	P	
Complementares - Barreira rígida	C	C	C	C	C	
Complementares - Guarda-corpos	C	C	C	C	C	
Complementares - Contratrilho	C	C	C	C	C	
Via permanente - Trilho/Dormente	P	P	P	P	P	
Via permanente - Lastro	C	C	C	C	C	
Via permanente - Fixações	P	P	P	P	P	

ANEXO B

NOTAS DE CLASSIFICAÇÃO DE OAE EXTRAÍDAS DA ABNT NBR 9452:2023

Tabela 9: Nota de classificação das OAE segundo parâmetros estruturais por tipo de elemento (E.2)

Categoria	Condição verificada na inspeção (parâmetros estruturais)	Nota de classificação		
		Elemento onde foi constatada a anomalia		
		Principal	Secundário	Complementar
Fissuração	Fissuração superficial de retração, hidráulica ou térmica	5	5	5
	Fissuras em elementos de concreto armado com abertura dentro dos limites previstos conforme a ABNT NBR 6118	4	5	5
	Fissuras em elementos de concreto armado com abertura superior aos limites previstos conforme a ABNT NBR 6118	2	3	4
	Fissuras em elementos de concreto protendido	1	2	-
Flecha	Flechas não congênitas e acima dos limites conforme a ABNT NBR 6118	2	3	-
Anomalias na armadura	Armadura passiva principal exposta e corroída, com perda de seção de até 20 % da área total de uma barra	3	4	5
	Armadura passiva principal exposta e corroída, com perda de seção acima de 20 % da área total de uma barra ou que comprometa a estabilidade da peça	2	3	4
	Ruptura de parte da armadura principal passiva	1	2	3
	Ruptura de tirante ou parte de sua armadura principal ativa	0	1	-
	Armadura protendida exposta e corroída	1	2	-
Anomalias no concreto	Concreto segregado com áreas inferiores a 0,1 m ² ou 10 % da superfície aparente do elemento estrutural (adotar a situação mais crítica), em regiões de tensões de compressão	4	5	5
	Concreto segregado em pequenas áreas (entre 0,1 m ² e 0,5 m ²) ou de 10 % a 20 % da superfície aparente do elemento estrutural (adotar a situação mais crítica), em regiões de tensões de compressão	3	4	5
	Concreto segregado em área superior a 0,5 m ² ou 20 % da superfície aparente do elemento estrutural (adotar a situação mais crítica), em regiões de tensões de compressão	2	3	4
	Rompimento do concreto em pontos de altas tensões de compressão	0	1	3
	Danos no concreto por temperaturas elevadas, com exposição de armaduras	1	2	4

Fonte: ABNT, 2023

Tabela 10: Nota de classificação das OAE segundo parâmetros estruturais (E.3)

Condição verificada na inspeção (parâmetros estruturais)		Nota de classificação
Apoio (mesoestrutura)	Deslocamento e/ou desalinhamento de peças estruturais gerando excentricidades, causando fissuras, instabilidades e concentração de tensões	1
	Deslocamento e/ou desalinhamento de peças estruturais gerando excentricidades, podendo causar fissuras, instabilidades e concentração de tensões	2
	Vigas transversinas ou longarinas mal ou insuficientemente apoiadas em pilares. Sintomas localizados, como grandes fissuras junto aos apoios na interface das vigas e pilares podem vir a reforçar este juízo	1
Aparelhos de Apoio	Aparelhos de apoio de neoprene com pequenos rasgos na camada superficial, sem exposição das chapas de fretagem	5
	Aparelhos de apoio metálicos com corrosão superficial sem comprometimento de sua capacidade portante	5
	Aparelhos de apoio comprometidos por ações mecânicas, ações de incêndio e intempéries, gerando vínculos imprevistos com cunhas de ruptura e recalques diferenciais com fissuras	2
	Aparelhos de apoio danificados totalmente rompidos, dando origem a esforços horizontais e/ou travamento de rotações, indesejáveis ao esquema estrutural original	1
	Ausência de aparelhos de apoio	0
Juntas	Juntas de dilatação parcialmente obstruídas sem causar restrições à movimentação dos tabuleiros	5
	Juntas de dilatação obstruídas, causando restrições à movimentação dos tabuleiros	4
	Juntas de dilatação obstruídas, com contribuição para o quadro patológico com formação de fissuras em vigas longarinas e lajes	3
	Juntas de dilatação obstruídas, causando graves danos à superestrutura (esmagamento do concreto de vigas e lajes, formação de quadro de fissuração e esforços não previstos na meso e infraestrutura)	2
Encontros	Taludes de encontro com pequenos sulcos, sem causar danos às fundações	5
	Taludes de encontro com erosão, com situação estabilizada, sem causar danos às fundações	4
	Deslizamento de taludes de encontro gerando possível perda de base de apoio de fundações e/ou empuxos ativos nos pilares	1
	Desníveis do pavimento na transição terrapleno x tabuleiro, gerando acréscimo no impacto da carga acidental	3
Outros	Drenos inexistentes ou comprometidos no interior dos caixões, acarretando retenção de água no seu interior	3

Fonte: ABNT, 2023

Tabela 11: Nota de classificação das OAE segundo parâmetros estruturais por tipo de elemento (E.4)

Categoria	Condição verificada na inspeção (parâmetros estruturais)		Nota de classificação		
			Elemento onde foi constatada a anomalia		
			Principal	Secundário	Complementar
Superestrutura	Corrosão em elementos estruturais metálicos	Corrosão localizada com perda de seção de até 20 %	2	3	4
		Corrosão localizada com perda de seção acima de 20 %	1	2	3
	Fissuras e/ou ruptura em elementos estruturais metálicos	Fissuras nas chapas de ligação	2	3	4
		Fissuras nos elementos estruturais	2	3	4
		Elemento estrutural rompido	0	1	3
	Ligações	Degradação ou ausência de até 20 % de conectores	1	2	3
		Degradação ou ausência acima de 20 % de conectores	0	1	2
		Falta de aperto dos conectores	1	2	3
	Deformações	Deformações localizadas em elementos metálicos comprimidos	3	3	3
		Deformações localizadas em elementos metálicos tracionados	4	4	4
		Flechas acima dos limites conforme a ABNT NBR 16694	2	3	-
		Deslocamento longitudinal	2	-	-
		Deslocamento transversal da estrutura	2	-	-
	Outras anomalias	Estado precário da via permanente sobre a OAE inspecionada	2	-	-

Fonte: ABNT, 2023

Tabela 12: Nota de classificação das OAE segundo parâmetros estruturais por tipo de elemento (E.5)

Categoria	Condição verificada na inspeção (parâmetros estruturais)		Nota de classificação		
			Elemento onde foi constatada a anomalia		
			Principal	Secundário	Complementar
Mesoestrutura	Estruturas de encontro	Instabilidade, desaprumo, rotação, recalque	2	2	-
		Desalinhamento ou desnivelamento	2	2	-
	Pilares	Vigas transversinas ou longarinas mal ou insuficientemente apoiadas nos pilares	1	1	-
Infraestrutura		Recalque ou qualquer comprometimento grave visível	1	1	-
Aparelhos de apoio		Aparelhos de apoio de neoprene com pequenos rasgos na camada superficial, sem exposição das chapas de fretagem	3		
		Aparelhos de apoio metálicos com corrosão superficial	4		
		Aparelhos de apoio danificados ou comprometidos gerando alguma vinculação sem causar grandes esforços, recalques diferenciais e sem criação de cunhas de ruptura ou fissuras no entorno	3		
		Aparelhos de apoio comprometidos, gerando vínculos imprevistos com cunhas de ruptura e recalques diferenciais com fissuras	2		
		Aparelhos de apoio danificados e/ou totalmente rompidos, dando origem a esforços horizontais e/ou travamento das rotações, indesejáveis no esquema estrutural original	2		
		Ausência de aparelho ou elemento de apoio	0 ou 1 conforme avaliação da concepção estrutural		

Fonte: ABNT, 2023

Tabela 13: Nota de classificação das OAE segundo parâmetros funcionais (E.6)

Categoria	Condição verificada na inspeção (parâmetros funcionais)	Nota de classificação
Drenagem	Drenagem deficiente, sem causar empoçamento ou risco de aquaplanagem	3
	Drenagem no tabuleiro deficiente com empoçamentos localizados que não provoquem fenômeno de aquaplanagem	3
	Drenagem ineficiente ou inexistente gerando pontos úmidos e formação de lâmina de água, possibilitando derrapagem ou o fenômeno de aquaplanagem	2
	Drenagem comprometida ou insuficiente ao longo da estrutura, permitindo empoçamento de águas e detritos	3
Pista	Pista de rolamento com pequenas irregularidades, sem gerar desconforto ao usuário	4
	Pista de rolamento com irregularidades, gerando desconforto ao usuário	3
	Desníveis no pavimento, na transição terrapleno x tabuleiro e juntas de dilatação, causando solavancos	3
Via permanente ferroviária	Fixação insuficiente/ineficiente dos trilhos nos dormentes. Placas de apoio faltantes ou rompidas	3
	Dormentes podres, desalinhados, trincados ou cisalhados	3
Juntas	Pontos danificados nas juntas de dilatação sem causar desconforto ao usuário	3
	Berço danificado nas juntas de dilatação, gerando pequeno desconforto ao usuário	3
Dispositivos de segurança	Dispositivos de segurança com pontos danificados (segregação de concreto, armadura exposta), sem comprometimento da segurança dos usuários	3
	Dispositivos de segurança danificados ou inexistentes, comprometendo a segurança dos usuários	1
	Inexistência de dispositivos de segurança para proteção de peças estruturais sujeitas a impactos de veículos ou embarcações	2
	Sinalização horizontal e vertical inadequadas ou inexistentes, com risco à segurança da obra e usuários	2
Passarela e outras OAE	Passeio rompido	1
	Guarda-corpo rompido ou inexistente	1
Gabaritos	Gabaritos horizontais ou verticais inadequados sem histórico de acidentes	3
	Gabaritos horizontais ou verticais inadequados com histórico de acidentes	1

Fonte: ABNT, 2023

Tabela 14: Nota de classificação das OAE segundo parâmetros de durabilidade por tipo de elemento (E.7)

Categoria	Condição verificada na inspeção (parâmetros estruturais)	Nota de classificação		
		Elemento onde foi constatada a anomalia		
		Principal	Secundário	Complementar
Anomalias no concreto	Concreto segregado com áreas inferiores a 0,1 m ² ou 10 % da superfície aparente do elemento estrutural (adotar a situação mais crítica), em regiões de tensões de compressão	4	5	5
	Concreto segregado em áreas pequenas (entre 0,1 m ² e 0,5 m ²) ou de 10 % a 20 % da superfície aparente do elemento estrutural (adotar a situação mais crítica), em regiões de tensões de compressão	4	4	4
	Concreto segregado em área superior a 0,5 m ² ou 20 % da superfície aparente do elemento estrutural (adotar a situação mais crítica), em regiões de tensões de compressão	3	3	3
	Lixiviação superficial do concreto	3	4	4
	Ruptura do concreto em pontos de altas tensões de compressão	0	1	3
	Danos no concreto por temperaturas elevadas com exposição de armaduras	1	2	4
	Manchas superficiais de fuligem atmosférica (sem comprometimento do requisito de durabilidade)	4	5	5
Carbonatação	Eflorescências, com surgimento de manchas esbranquiçadas decorrentes de reação de carbonatação	3	3	4
	Carbonatação com profundidade atingindo armaduras principais	2	3	4

Fonte: ABNT, 2023

Tabela 15: Nota de classificação das OAE segundo parâmetros de durabilidade por tipo de elemento (E.8)

Categoria	Condição verificada na inspeção (parâmetros de durabilidade)	Nota de classificação
Drenagem	Buzinotes obstruídos	3
	Drenagem do caixão inexistente ou insuficiente, com acúmulo de água	2
	Presença de água internamente às bainhas da armadura protendida	1
	Drenagem do tabuleiro totalmente inoperante	2
	Deficiência e/ou danos nos sistemas de drenagem dos taludes com carreamento de materiais	2
	Deficiência e/ou danos nos sistemas de drenagem dos taludes sem carreamento de materiais	3
Taludes	Taludes dos encontros com erosão localizada ou solapamento de material	3
	Taludes dos encontros com erosão significativa	2
	Taludes dos encontros com erosão significativa, acarretando desconfinamento da fundação	1
	Taludes revestidos, com danos nos revestimentos	4

Fonte: ABNT, 2023

Tabela 16: Nota de classificação das OAE segundo parâmetros de durabilidade por tipo de elemento (E.8)

Categoria	Condição verificada na inspeção (parâmetros estruturais)		Nota de classificação		
			Elemento onde foi constatada a anomalia		
			Principal	Secundário	Complementar
Super e Mesoestrutura	Corrosão	Quadro de corrosão sem comprometimento estrutural	3	4	5
		Quadro de corrosão causando comprometimento estrutural	0	2	3
	Proteção Mecânica	Proteção superficial insuficiente	2	3	4

Fonte: ABNT, 2023