



**UNIVERSIDADE
FERNANDO
PESSOA**

MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO – ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DA CATEDRAL DE BRASÍLIA – BRASIL – MÉTODO GDE/UNB

Pathological Manifestations in Reinforced Concrete Structures - Case Study: Analysis of
the Cathedral of Brasília – Brazil – GDE/UnB Method

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil

Andreia Schmidt

Orientador:

Doutor Leonel Ramos

Junho 2025



**UNIVERSIDADE
FERNANDO
PESSOA**

MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO – ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DA CATEDRAL DE BRASÍLIA – BRASIL – MÉTODO GDE/UNB

Pathological Manifestations in Reinforced Concrete Structures - Case Study: Analysis of
the Cathedral of Brasília – Brazil – GDE/UnB Method

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil

Andreia Schmidt

Orientador:

Doutor Leonel Ramos

Junho 2025

Dedico à Deus e à minha família!

Agradecimentos

Inicialmente, expresso minha gratidão à Deus por tudo que tem me permitido conhecer, viver e conquistar ao longo desta jornada.

Gostaria de também dedicar meus sinceros agradecimentos à esta reconhecida instituição de ensino superior, que leva o nome de tão estimado poeta português, Universidade Fernando Pessoa. Sinto-me grata pela acolhida, pelo respeito e carinho recebidos, mesmo sendo uma estudante estrangeira.

Também dedico meus agradecimentos aos Doutores Prof. Miguel Ferreira, atual coordenador do curso de Mestrado em Engenharia Civil, e Prof. Leonel Ramos, meu orientador, que tão pacientemente dedicou-me seu tempo, por sua valiosa contribuição que tornou possível este trabalho, bem como aos membros da banca avaliadora, especialmente na pessoa do Prof. Doutor Miguel Azenha.

Além destes em especial, agradeço a todos os professores com os quais pude aprender ao longo do curso, pois foram de suma importância para o resultado que se materializa nestas páginas, além de cada colega do curso com os quais pude também aprender e compartilhar inúmeras experiências e momentos de aprendizado, cuja amizade de alguns levo para a vida.

Não obstante, agradeço aos meus familiares nas pessoas de minha avó Ivone, minha mãe Suzana e minha filha Andressa, que me apoiaram incondicionalmente nessa jornada e por vezes renunciaram a passeios, diversões e tempo juntas, para que me dedicasse a este propósito.

Muito obrigada a todos que de alguma forma fizeram parte desta conquista!

Gratidão!

Resumo

Este trabalho teve o propósito de estudar as principais manifestações patológicas que podem atacar o betão armado, desde a fase de projeto das estruturas, passando pela fase de execução e, posteriormente, na fase de uso do edifício. Pode-se destacar, dentre elas, a fissuração, a insuficiência do cobrimento da armadura e os desvios geométricos, como potenciais disfunções. No âmbito específico, o estudo relata as principais manifestações patológicas que acontecem na Catedral de Brasília, projetada por Oscar Niemeyer em 1958 e localizada na capital do Brasil. A estrutura do prédio foi concebida em betão armado e obedecia, dentre outras regras, a *NB-1: Regras para cálculo e execução das obras de betão* de 1940, norma para execução de estruturas em betão vigente no Brasil na época. Foram realizadas visitas ao edifício a fim de se fazer sua análise quanto às patologias presente na estrutura. A metodologia utilizada para a análise da estrutura foi a GDE (Grau de Deterioração da Estrutura), concebida inicialmente pela professora Eliane Kraus Castro, em 1994, e adaptada posteriormente para Obras de Arte Especiais pelo professor Rogério Calazans Verly. Em 2023, os professores Joao Carlos Teatini de Souza Clímaco e Antônio Alberto Nepumuceno lançaram o livro *Metodologia GDE Para estimativa dos graus de danos em estruturas de betão*, consolidando o método. Diversos outros pesquisadores utilizaram a metodologia para avaliar edifícios e obras de arte especiais na capital brasileira, inclusive, em 2020 houve o desabamento de um viaduto no centro da cidade que havia sido a pouco avaliado e atingido um grau GDE crítico da estrutura. A respeito da Catedral, após as visitas *in loco*, procedeu-se à classificação das famílias de elementos e dos danos encontrados e assim, feita a aplicação do método GDE/UNB (2023) que quantifica o Grau de Deterioração da Estrutura. A partir do resultado obtido, de **72**, é possível dizer quais as recomendações do método quanto à intervenção no edifício.

Palavras-chave: Manifestações patológicas, betão armado, Catedral de Brasília, Método GDE/UnB (2023).

Abstract

This work aimed to study the main pathological manifestations that can affect reinforced concrete, from the design phase of the structures, through the execution phase, and subsequently, in the use phase of the building. Among these, cracking, insufficient concrete cover for the reinforcement, and geometric deviations can be highlighted as potential dysfunctions. In the specific scope, the study reports the main pathological manifestations that occur in the Cathedral of Brasília, designed by Oscar Niemeyer in 1958 and located in the capital of Brazil. The building's structure was conceived in reinforced concrete and complied, among other rules, with NB-1: Rules for the calculation and execution of concrete works from 1940, the standard for the execution of concrete structures in force in Brazil at the time. Visits were made to the building to analyze its structure for existing pathologies. The methodology used for the analysis of the structure was GDE (Degree of Deterioration of the Structure), initially conceived by Professor Eliane Kraus Castro in 1994, and later adapted for Special Art Works by Professor Rogério Calazans Verly. In 2023, Professors Joao Carlos Teatini de Souza Clímaco and Antônio Alberto Nepumuceno launched the book "Metodologia GDE Para estimativa dos graus de danos em estruturas de betão" (GDE Methodology for estimating the degrees of damage in concrete structures), consolidating the method. Several other researchers have used the methodology to evaluate buildings and special art works in the Brazilian capital, including, in 2020, the collapse of a viaduct in the city center that had recently been evaluated and reached a critical GDE degree of the structure. Regarding the Cathedral, after on-site visits, the families of elements and the damages found were classified, and thus, the GDE/UNB (2023) method was applied, which quantifies the Degree of Deterioration of the Structure. From the obtained result of **72**, it is possible to state the method's recommendations regarding intervention in the building.

Keywords: Pathological manifestations, reinforced concrete, Cathedral of Brasília, GDE/UnB method (2023).

Índice Geral

INTRODUÇÃO.....	1
I CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
1.1 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE BETÃO	4
1.1.1 Desempenho	4
1.1.2 Vida Útil das Edificações	4
1.1.3 Origem de patologias nas estruturas	6
1.2 PRINCIPAIS PATOLOGIAS EM BETÃO ARMADO	8
1.2.1 Carbonatação do betão.....	8
1.2.2 Cobrimento Deficiente	10
1.2.3 Contaminação por cloretos	13
1.2.4 Corrosão das armaduras.....	15
1.2.5 Desagregação	17
1.2.6 Desplacamento.....	19
1.2.7 Desvio Geométrico	21
1.2.8 Eflorescência	23
1.2.9 Falhas na concretagem.....	25
1.2.10 Fissuras e trincas.....	27
1.2.11 Flechas excessivas	29
1.2.12 Impermeabilização deficiente.....	31
1.2.13 Infiltração.....	32
1.2.14 Obstrução das juntas de dilatação.....	34
1.2.15 Recalques.....	36
II CAPÍTULO II - MÉTODO GDE/UNB.....	39
II.1 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO	39
II.1.1 Processo de Cálculo – Metodologia GDE	40
II.1.1.1 Grau do dano	40
II.1.1.2 Grau de deterioração de um elemento	42
II.1.1.3 Grau de deterioração de uma família de elementos.....	42
II.1.1 Classificação de Elementos	43

II.1.1.1	Grau de deterioração da estrutura	43
III	CAPÍTULO III - CASO PRÁTICO [CATEDRAL DE BRASÍLIA]	45
I.1	HISTÓRICO DA CONSTRUÇÃO	45
III.1.1	Concepção Arquitetônica e Localização	46
III.1.2	Etapas da Obra e Soluções Estruturais	46
III.1.3	Fase de Finalização e Elementos Artísticos	48
III.1.4	Considerações Técnicas e Reconhecimento	49
IV	ANÁLISE E RESULTADOS	50
IV.1	ANÁLISE DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS	50
IV.1.1	Família de Pilares	50
IV.1.2	Família de Lajes.....	52
IV.1.3	Família de Revestimentos.....	54
IV.1.4	Família de Juntas de Dilatação	55
IV.1.1	Família de escadas e rampas.....	57
IV.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO GDE/UNB (2015).....	57
IV.3	RESULTADOS	58
IV.3.1	Cálculo do Grau de Deterioração da Estrutura.....	58
	CONCLUSÃO.....	60
	APÊNDICE I – Avaliação dos elementos da Catedral	
	APÊNDICE II – Cálculos Pormenorizados	
	APÊNDICE III – Aplicações do Método GDE/UnB	
	APÊNDICE IV – Outras Metodologias de Inspeção	
	ANEXO I – Fatores de intensidade	
	ANEXO II – Fatores de ponderação	
	ANEXO III – Sugestão de Fp’s para avaliações	

Índice de Figuras

Figura 1- Teste com fenolftaleína (MOUTINHO, 2016).	17
Figura 2 - Corrosão das armaduras - (TERSARIOL, 2017).....	17
Figura 3 - Vigas com desvio geométrico (FERRAZ, 2003).....	22
Figura 4 - Eflorescência (hrpremo.com.br)	23
Figura 5 - Falha de concretagem (AECweb, 2021)	25
Figura 6 – Laje com infiltração (Macre Engenharia, 2022)	33
Figura 7 - Recalque ilustrativo (petcivilem.com, 2014).....	36
Figura 8 - Prédios em desnível devido ao recalque (unicamp.br, 2021)	37
Figura 9 – Catedral Metropolitana de Brasília (2022).....	45
Figura 10 – Croqui de Oscar Niemeyer. (ArcoWeb, 2019).....	46
Figura 11 – Vista dos pilares ainda na fase de construção	46
Figura 12 – Oscar Niemeyer acompanhando a obra in loco.....	47
Figura 13 - Catedral de Brasília em construção (ARCHDAILY, 2012)	47
Figura 14 - Estrutura da Catedral de Brasília. Programa AutoCAD (PESSOA, 2002)..	48
Figura 15 - Estrutura de escoramento dos pilares (MAGALHÃES, 2001).....	48
Figura 16 – Vitrais (Autoria própria, 2025)	48
Figura 17 – Vitrais (Autoria própria, 2025)	48
Figura 18 – Pilares 7 e 13 do Apêndice I - Fissuras, umidade ascendente (Autoria própria)	51
Figura 19 – Localização dos Pilares (Autoria própria, 2025).....	52
Figura 20 – Manchas, fissuras, armadura exposta e corrosão na laje da sala de máquinas – Laje 01 do APÊNDICE I (autoria própria, 2025).....	53
Figura 21 – Lajes 03 e 04 do APÊNDICE I - Manchas, infiltração, desagregação e fissuras (Autoria própria, 2025).....	53

Figura 22 – Revestimentos 01 e 03 do APÊNDICE I - Manchas, fissuras, umidade (Autoria própria, 2025).....	55
Figura 23 – Juntas de dilatação externa do Espelho d'água e interna, do corredor para o banheiro Piso fissurado, pintura manchada, falha de selante da junta (Autoria própria, 2025).....	56
Figura 24 – Deslocamento, eflorescência, possível corrosão.	57

Introdução

O estudo das patologias em estruturas de betão armado vem sendo aprimorado a cada dia permitindo a identificação precoce de possíveis falhas graves em estruturas. Com o método apresentado neste trabalho é possível prever a dimensão das consequências a serem experimentadas por essas estruturas e, assim, mitigar os efeitos desses problemas.

A Catedral Metropolitana Nossa Senhora Aparecida, mais conhecida como Catedral de Brasília, inaugurada em 1970 é o alvo do presente estudo. Considerando sua idade, importância arquitetônica e valor histórico, é fundamental que sua estrutura seja periodicamente analisada. Nesse sentido, a NBR 9452:2019, Inspeção de Estruturas de Betão, recomenda que inspeções em edificações de betão armado sejam realizadas a cada três anos, reforçando a necessidade de avaliação periódica.

Aqui, optou-se por fazer a avaliação da gravidade das patologias detectadas aplicando-se a Metodologia GDE/UnB para estimativa dos graus de danos em estruturas de betão, onde é verificado o Grau de Deterioração da Estrutura.

A Metodologia GDE/UnB, desenvolvida inicialmente em 1994 pela engenheira civil Eliane Kraus Castro, tem por objetivo facilitar essa análise e atribuir um valor para o nível de Deterioração da estrutura. Com base nesse valor, é possível definir a urgência das intervenções, desde manutenções rotineiras até ações corretivas imediatas em casos de risco iminente.

A metodologia já originou várias pesquisas e adaptações, uma delas em 2015 pelo professor Rogério Calazans Verly, que propôs sua aplicação como instrumento de priorização de intervenções em obras de arte especiais. Já em 2023 foi publicado o livro Metodologia GDE para estimativa dos graus de danos em estruturas de betão pela Editora UnB, pelos professores João Carlos Teatini de Souza Clímaco e Antônio Alberto Nepomuceno.

Neste trabalho, a Metodologia dá base ao estudo das patologias na estrutura da Catedral, concebida pelo arquiteto brasileiro Oscar Niemeyer. Além disto, o estudo tornou possível a identificação das reais condições em que o prédio se encontra, bem como a proposição com respaldo técnico, das ações recomendadas de acordo com o nível de comprometimento estrutural obtido.

1.1 Interesse e justificação da dissertação

As patologias em betão armado podem ter início de forma aparentemente inofensiva e levar a estrutura à ruína. Os problemas podem estar presentes desde a fase de projeto, passando pela fase de execução, até o uso da edificação. Por esta razão, é necessário estar atento aos sinais que são dados pela estrutura antes da entrada em colapso. Nesse sentido, o estudo detalhado de como essas patologias se apresentam e evoluem é essencial, portanto, ter instrumentos de avaliação dessas patologias se mostra imprescindível. Sendo assim, o intuito aqui é fazer a avaliação de um monumento da capital brasileira, utilizando-se de um dos diversos métodos disponíveis para tal.

A investigação das manifestações patológicas na Catedral de Brasília utilizando a metodologia GDE/UnB, reveste-se de importância em múltiplas dimensões. No âmbito acadêmico, contribui para o avanço do conhecimento na área de conservação e restauração de obras. Do ponto de vista técnico, a análise detalhada das patologias e a aplicação da metodologia específica podem gerar dados valiosos para futuras intervenções. Finalmente, a dimensão social se manifesta na preservação de um bem cultural e arquitetônico de grande significado para a sociedade brasileira.

1.1.1. Relevância Acadêmica e Científica

Importa destacar a importância tanto acadêmica quanto científica do estudo das Patologias em estruturas históricas. Embora existam estudos consolidados sobre degradação em betão armado (MEHTA, 2014), a aplicação de metodologias quantitativas, como o GDE/UNB, em edifícios emblemáticos do modernismo ainda é escassa, especialmente em obras de Oscar Niemeyer, cuja abordagem estrutural desafiava convenções.

Este trabalho amplia a aplicação do método GDE/UNB, originalmente desenvolvido para pontes por KRAUS CASTRO em 1994 e adaptado por Verly (2015) e Teatini (2023) para "obras de arte especiais", validando sua eficácia em património arquitetónico.

1.1.2. Importância Técnica e Normativa

A partir da perspectiva da segurança e durabilidade dos edifícios, vale apontar que a Catedral, com mais de 50 anos de exposição a agentes ambientais, a exemplo de pluviosidade tropical e variações térmicas, apresenta riscos como carbonatação do betão e corrosão de armaduras, cuja progressão pode comprometer a estabilidade estrutural, de

acordo com parâmetros da Norma Brasileira para Projetos de estruturas de betão (NBR 6118:2023).

Além disso, o método contribui para o alinhamento com diretrizes da NBR 9452:2019 (inspeção de pontes viadutos e passarelas: procedimento), que recomenda inspeções periódicas em estruturas de betão, contudo não apresenta métodos padronizados para priorização de intervenções. O GDE/UNB supre essa lacuna ao quantificar o grau de deterioração, oferecendo critérios objetivos para gestores públicos ou privados.

1.1.3. Valor Social e Cultural

Ao se falar a respeito do valor social e cultural do estudo, destaca-se a questão do Património reconhecido pela Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura – UNESCO, que é uma agência especializada da ONU, cujo objetivo é contribuir para a paz mundial por meio da educação, ciência, cultura e comunicação.

A Catedral é um importante monumento da capital do Brasil, que é classificada como Património Mundial desde 1987. Sua preservação é vital não apenas para a memória arquitetônica, mas também para a identidade cultural brasileira. Sob o aspecto econômico, intervenções tardias em estruturas degradadas elevam os custos de reparação em até 300% (IBTON, 2018). Portanto, este estudo fornece subsídios para ações preventivas, otimizando recursos.

Sobre este trabalho, no primeiro capítulo é feita a revisão bibliográfica com destaque às principais patologias que podem ser encontradas nas estruturas de betão armado e que são abordadas pelo método de avaliação escolhido, que é destacado no segundo capítulo. O método GDE é detalhado e demonstrado todo o seu mecanismo de cálculo.

Em seguida, no terceiro capítulo é apresentado o estudo de caso proposto, desde a concepção de seu projeto, até a análise de sua estrutura com base na metodologia escolhida e, por fim, são apresentados análise e resultados dessa avaliação.

Sem dúvidas, um trabalho enriquecedor e que traz muita honra para esta autora, que teve oportunidade de rever diversos conceitos, aprender outros tantos e aplicá-los a uma estrutura que é considerada patrimônio da humanidade.

I CAPÍTULO - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Manifestações patológicas em estruturas de betão

Inicialmente, é importante destacar os conceitos de desempenho, vida útil e durabilidade, pois são fundamentais para a qualidade e sustentabilidade das edificações. Esses aspectos estão intrinsecamente relacionados à capacidade de uma estrutura ou componente construtivo atender às exigências funcionais, técnicas e econômicas ao longo do tempo.

1.1.1 Desempenho

A performance de um sistema construtivo refere-se à sua capacidade de cumprir funções específicas sob condições pré-determinadas. Segundo Souza et al. (2018), o desempenho está associado a critérios como resistência, estabilidade, conforto térmico e acústico, segurança e funcionalidade.

A norma ISO 15686 (2011) define desempenho como "a medida em que uma edificação ou parte dela atende aos requisitos estabelecidos, considerando seu uso pretendido". Já Helene e Terzian (1993) destacam que o desempenho deve ser avaliado desde a fase de projeto, considerando-se fatores como materiais, técnicas executivas e exposição ambiental.

1.1.2 Vida Útil das Edificações

A vida útil é o período durante o qual uma estrutura mantém suas propriedades funcionais para qual foi projetada sem necessidade de reparos significativos. Conforme Shohet e Paciuk (2004), a vida útil depende de fatores como qualidade dos materiais, condições ambientais (clima, poluição, umidade) e manutenções preventivas e corretivas.

Já Mosseri (2010) classifica a vida útil em vida útil física e vida útil econômica. A vida útil física relacionada à degradação material, ou seja, refere-se ao tempo em que um o sistema construtivo mantém suas propriedades funcionais antes que a degradação natural o torne inoperante ou inseguro. Essa degradação pode ser causada por: fatores ambientais, esforços mecânicos e processos químicos e biológicos.

Os fatores ambientais podem ser identificados por meio de umidade, ciclos de gelo-degelo, ataques químicos (como carbonatação do betão ou corrosão de armaduras),

radiação UV (em polímeros e tintas). Os esforços mecânicos serão apresentados pela fadiga de materiais, abrasão em pisos ou mesmo vibrações em estruturas.

Já os processos químicos e biológicos poderão ser vistos por meio da corrosão, dos ataques por sulfatos, do crescimento de fungos e bactérias em materiais orgânicos. Um exemplo muito recorrente é o betão sem proteção adequada que, em um ambiente marinho, pode sofrer corrosão das armaduras antes do período projetado, diminuindo sua vida útil de forma significativa, enquanto um betão com aditivos impermeabilizantes e cobrimento adequado pode ultrapassar 50 anos sem grandes intervenções (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

A vida útil econômica pode ser entendida como tempo em que a estrutura é viável financeiramente considerando custos de manutenção, reparos e atualizações tecnológicas. Quando os custos de reparação superam o valor residual ou a eficiência do sistema, atinge-se o fim da vida útil econômica.

Dentre os fatores que influenciam a vida útil econômica, os custos de operação e manutenção, que podem ser verificados, por exemplo, em sistemas obsoletos (como instalações elétricas antigas) e podem exigir gastos crescentes; o valor de mercado, que pode ser prejudicado no caso de edifícios com tecnologias ultrapassadas, pois perdem valor comercial antes mesmo de apresentarem falhas físicas; as regulamentações e normas refletidas nas mudanças constantes nas leis de eficiência energética ou acessibilidade, e podem tornar uma construção economicamente inviável antes de sua degradação física.

Não obstante, com o avanço tecnológico, sistemas de climatização têm aumentado significativamente sua eficiência. Dessa forma, mesmo que um sistema antigo ainda esteja operando dentro de sua vida útil física, seu elevado consumo energético, em comparação com modelos mais modernos, pode tornar sua substituição economicamente viável antes que ocorra a falha total vida útil funcional, ou seja, o período em que atende às necessidades dos usuários.

Dentro da normativa brasileira, pode-se citar a norma NBR 15575 (2021), que estabelece parâmetros mínimos de vida útil para sistemas construtivos no Brasil, servindo como referência para avaliações técnicas.

A respeito da durabilidade, pode-se dizer que está diretamente ligada à resistência dos materiais e sistemas frente a agentes de degradação. Segundo Mehta e Monteiro (2014),

a durabilidade do betão, por exemplo, depende da qualidade do traço, da cura, da porosidade, da permeabilidade, da exposição à ataques por cloretos, sulfatos ou à carbonatação.

Tuuti (1982) propôs um modelo de degradação em duas fases: o período de incubação, que é o tempo até o início da degradação, e o período de propagação, que contempla o avanço dos danos até o limite aceitável.

Andrade e D'Andrea (2010) destacam que a durabilidade deve ser considerada no projeto, com especificação de materiais adequados e proteções contra corrosão e intempéries. Conforme Silva et al. (2019), a gestão da durabilidade desde o projeto pode reduzir custos de manutenção e aumentar a sustentabilidade das construções.

Além disso, o conceito de desempenho, vida útil e durabilidade são interdependentes. Um bom desempenho contribui para a extensão da vida útil do sistema, enquanto a durabilidade dos materiais assegura a manutenção desse desempenho ao longo do tempo. Assim, a vida útil pode ser compreendida como o resultado da interação entre desempenho e durabilidade.

Portanto, pode-se afirmar que o desempenho, a vida útil e a durabilidade são pilares para a qualidade das construções. A literatura demonstra que a integração desses conceitos desde a fase de projeto, com a seleção adequada de materiais e técnicas construtivas, é fundamental para garantir estruturas seguras, econômicas e sustentáveis.

1.1.3 Origem de patologias nas estruturas

Patologias nas estruturas de betão armado podem ser entendidas como "doenças" que comprometem a funcionalidade, segurança e durabilidade das edificações. Suas causas estão frequentemente associadas a falhas nas diferentes etapas do processo construtivo: projeto, execução e utilização/manutenção. Como o processo de construção se divide nestas etapas, existem patologias que podem surgir caracteristicamente em uma ou outra e persistir pelas demais.

O projeto estrutural é a etapa fundamental para prevenir patologias. Erros nessa fase tendem a gerar problemas complexos e de alto custo para correção. Segundo Souza e Ripper (1998), as dificuldades técnicas e os custos para solucionar problemas patológicos são diretamente proporcionais à antiguidade da falha, ou seja, quanto mais tempo a

manifestação patológica permanece sem correção, mais complexa e onerosa tende a ser sua reparação.

Podem ser destacados como erros na fase de estudo preliminar ou detalhamento inadequado a falta de investigação geotécnica detalhada. Esta falta pode levar a escolhas incorretas de fundações, resultando em recalques diferenciais, fissuras e até colapso (BERBERIAN, 2016). Edifícios em solos expansivos sem tratamento adequado podem apresentar trincas em paredes e lajes devido a movimentações do terreno.

Adicionalmente, armaduras insuficientes, espaçamento inadequado de estribos ou o posicionamento incorreto de juntas de dilatação podem provocar fissuração excessiva e corrosão prematura das armaduras. Cobrimentos inferiores ao recomendado para a classe de agressividade ambiental reduzem significativamente a vida útil da estrutura, acelerando processos de carbonatação e corrosão das armaduras.

Outro ponto importante é a ausência de compatibilização entre os projetos, situação que pode resultar em falhas como pontes térmicas, infiltrações e cortes acidentais em armaduras, comprometendo o desempenho da edificação. Segundo Souza e Ripper (1998), conflitos entre projetos são fontes recorrentes de manifestações patológicas, especialmente quando não identificados nas fases iniciais do empreendimento.

Já na fase de execução, pode-se observar que mesmo em posse de um projeto bem elaborado, falhas de execução podem ocorrer quando não há um monitoramento adequado, conforme as normas técnicas e as boas práticas de mercado. Essa etapa é frequentemente apontada como a principal origem das manifestações patológicas nas edificações, uma vez que erros de execução comprometem diretamente o desempenho e a durabilidade dos sistemas construtivos.

Por exemplo, a má aplicação de revestimentos, presença de armaduras expostas ou com pouco cobrimento, fissuras em elementos, uso inadequado de materiais de junta e instalação incorreta de esquadrias são exemplos de falhas de execução recorrentes em inspeções técnicas. De acordo com Souza e Ripper (1998), a maioria das manifestações patológicas está relacionada a falhas nessa fase, decorrentes da não observância de normas técnicas, uso inadequado de materiais ou ausência de controle durante as etapas construtivas.

Quanto à fase de utilização, a ausência de manutenção preventiva aliada ao uso inadequado das edificações é uma das principais causas de degradação estrutural.

Alterações de uso, como a conversão de um imóvel residencial para comercial, podem causar sobrecargas incidentais em lajes e vigas, resultando em fissuras por flexão. Da mesma forma, infiltrações não reparadas em fachadas ou telhados promovem a corrosão das armaduras e a deterioração do betão, como por exemplo, vazamentos em banheiros sem impermeabilização adequada comprometem a estrutura a longo prazo. Além disso, estruturas expostas a agentes agressivos, como cloretos em ambientes marinhos ou sulfatos em áreas industriais, requerem proteção especial para evitar danos severos (ANDRADE & D'ANDREA, 2010).

Para minimizar esses problemas, recomenda-se uma abordagem integrada, que envolva desde um projeto cuidadoso, com investigações geotécnicas detalhadas e adoção de critérios de durabilidade conforme as normas brasileiras NBR 6118:2023 e NBR 15575:2021, bem como o Eurocódigo 2 (EN 1992), amplamente utilizado na Europa, até uma execução rigorosamente fiscalizada, incluindo controle do betão e treinamento adequado da mão de obra. Finalmente, a manutenção deve ser contínua, com inspeções periódicas e reparos imediatos para garantir a longevidade das edificações.

1.2 Principais Patologias em Betão Armado

As estruturas em betão armado estão sujeitas a diversas manifestações patológicas que podem comprometer o seu desempenho ao longo do tempo. Estas anomalias, que podem surgir em diferentes fases do ciclo de vida da estrutura - desde a concepção e execução até a utilização e manutenção - representam um desafio significativo para engenheiros de produção e projetistas. Aqui serão analisadas as principais manifestações patológicas presentes em estruturas em betão armado, de forma objetiva e fundamentada em normas brasileiras (NBR) e europeias (Eurocódigos).

1.2.1 Carbonatação do betão

A carbonatação é um processo químico pelo qual o dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera penetra no betão e reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente na matriz cimentícia, formando carbonato de cálcio (CaCO_3). Essa reação aumenta a concentração de CO_2 dentro do betão, reduzindo significativamente o pH da matriz, de aproximadamente 12,5–13,5 para valores inferiores a 9,5, comprometendo a alcalinidade responsável por manter o aço em estado passivo (MEHTA & MONTEIRO, 2014). Sem

essa passivação alcalina, o aço torna-se suscetível à corrosão, iniciando o processo de degradação da estrutura.

A profundidade da carbonatação pode ser avaliada por meio do ensaio de fenolftaleína, conforme descrito na norma LNEC E 392. Para retardar esse processo, revestimentos superficiais com hidrofugantes de penetração profunda são eficazes.

A velocidade e a profundidade da carbonatação são influenciadas por fatores como a umidade do ambiente, a concentração de CO_2 no ar, a porosidade do betão e a qualidade da execução da estrutura. A Figura 1 ilustra o avanço da frente de carbonatação no betão e a conseqüente redução do pH da matriz cimentícia, destacando a relação entre a profundidade da carbonatação e a despassivação das armaduras. A figura é uma representação visual útil para compreender o impacto da carbonatação na durabilidade das estruturas de betão armado (NASCIMENTO et al., 2021).

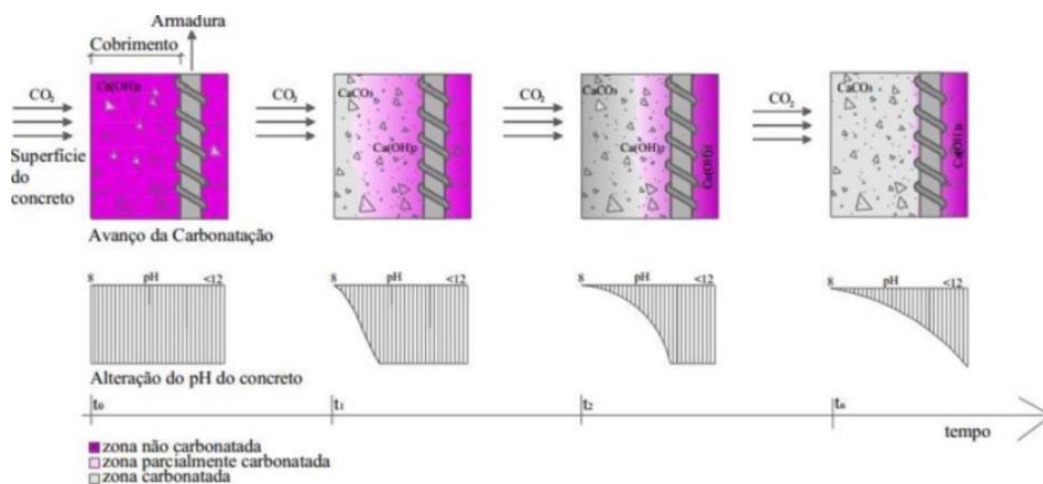


Figura 1 - Carbonatação (NASCIMENTO et al., 2021)

O avanço da carbonatação depende da permeabilidade e da qualidade do betão, da espessura do cobrimento, do grau de umidade e da concentração de CO_2 no ambiente. Betões com baixa densidade, alta porosidade, ou mal curados aceleram a penetração do CO_2 (ANDRADE & D'ANDREA, 2010). Não obstante, ambientes urbanos com alta concentração de poluentes aumentam a velocidade da carbonatação. Além disso, ciclos úmido-seco favorecem a penetração e a reação.

A despassivação por carbonatação leva à corrosão das armaduras, que por sua vez provoca fissuração e deslocamento do betão (*spalling*). Isso reduz a seção útil do aço e a capacidade resistente da estrutura, podendo causar falhas prematuras e riscos à

segurança (NBR 6118, 2023). A carbonatação é uma das principais causas da redução da vida útil das estruturas de betão armado.

Para identificar a carbonatação é comum o uso do indicador de fenolftaleína, que muda de cor conforme o pH do betão. Medições da profundidade da carbonatação são realizadas por perfuração e análise da cor do reagente. Ensaios eletroquímicos, como potencial de corrosão das armaduras, auxiliam a detectar corrosão já iniciada (SOUZA & RIPPER, 1998). Sem prejuízo, o monitoramento contínuo também pode ser feito com sensores embutidos.

Para prevenir a carbonatação, a recomendação é o uso de betão com baixa permeabilidade ou porosidade, cobrimento adequado conforme a NBR 6118:2023, cura correta e uso de aditivos que reduzam a porosidade, conforme explicitado na NBR 12655, 2022 (betão de cimento portland preparo controle recebimento e aceitação: procedimento). Os reparos necessários envolvem a remoção do betão carbonatado, limpeza das armaduras e aplicação de novo betão ou argamassas com inibidores de corrosão. Adicionalmente, selantes e revestimentos impermeabilizantes podem ser utilizados para evitar a entrada de CO₂.

1.2.2 Cobrimento Deficiente

O cobrimento de betão é definido na NBR 6118:2023 como a espessura mínima de betão que recobre as armaduras, garantindo sua proteção contra agentes agressivos, como umidade, cloretos e dióxido de carbono. Quando esse cobrimento é insuficiente, a estrutura fica vulnerável a manifestações patológicas, como corrosão das armaduras, fissuração e redução da vida útil.

A princípio, o cobrimento deficiente é uma falha evitável que compromete significativamente a durabilidade e a segurança das estruturas. Enquanto técnicas de reparo podem remediar problemas existentes, a prevenção por meio de projeto adequado, materiais de qualidade e controle rigoroso na execução é a estratégia mais eficaz. A adoção de normas atualizadas e tecnologias inovadoras, bem como betão de alto desempenho e monitoramento automatizado, representa o futuro da construção durável.

Segundo orientações da NBR 6118:2023, o cobrimento mínimo deve ser feito em função da classe de agressividade ambiental à qual a estrutura pertença. A Tabela 1, retirada desta

mesma NBR, mostra a relação da classe de agressividade ambiental com o cobrimento nominal adequado à cada situação.

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

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

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

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

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

Tabela 1- Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal (ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118, 2023).

A insuficiência do cobrimento das armaduras é decorrente de uma combinação de falhas em projeto, execução e controle de qualidade. No projeto, erros frequentes incluem a especificação de espessuras de cobrimento incompatíveis com a classe de exposição ambiental, como prever apenas 20 mm em ambientes urbanos, quando a NBR exige, no mínimo, 30 mm. Além disso, a não consideração da agressividade do meio compromete diretamente a durabilidade da estrutura.

Durante a execução, o problema pode ocorrer devido ao posicionamento incorreto das armaduras, deslocamentos durante a concretagem, utilização de espaçadores inadequados ou em quantidade insuficiente, além de deformações nas fôrmas ou vibração excessiva do betão, que resultam em assentamentos desiguais. Por fim, a ausência de fiscalização rigorosa e a aceitação de desvios superiores aos limites toleráveis, especialmente em elementos estruturais críticos, onde o cobrimento deve obedecer a tolerâncias de ± 5 mm, agravam ainda mais a situação.

A insuficiência do cobrimento do betão sobre as armaduras tem impactos diretos e significativos sobre a durabilidade e o desempenho estrutural da edificação. O cobrimento

deficiente compromete a estrutura quanto a redução da proteção contra corrosão, pois a menor espessura de betão permite penetração mais rápida de CO₂ (carbonatação) e cloretos, acelerando a corrosão das armaduras. É possível observar que a profundidade de carbonatação em 10 anos pode ser 2 a 3 vezes maior em cobrimentos de 15 mm vs. 30 mm (Tuutti, 1982).

A falha no cobrimento também tem impactos em outros aspectos da estrutura como:

- Perda de Resistência ao Fogo: espessuras insuficientes reduzem a resistência ao fogo, podendo causar falhas prematuras em situações de incêndio (Eurocódigo 2).
- Fragilização da Aderência Aço-Betão: impactando na resistência característica, cobrimentos muito finos aumentam o risco de fissuração, reduzindo a eficiência da transferência de tensões entre o aço e o betão;
- Redução de durabilidade: com a aceleração de processos de deterioração como a carbonatação a vida útil do sistema é encurtada (HELENE & PEREIRA, 2015);
- Corrosão prematura: O cobrimento atua como barreira física e química de proteção. Quando está abaixo do mínimo exigido pela NBR 6118:2023, essa barreira é comprometida;
- Aumento dos Custos de Manutenção e Reparo: a intervenção em estruturas de betão armado para o tratamento das armaduras requer o destacamento do material e a recomposição da seção estrutural, além de medidas de reforço e impermeabilização, gerando altos custos não previstos em manutenção (SOUZA & RIPPER, 1998).

No intuito de fazer esse monitoramento, a avaliação do cobrimento é necessária e pode ser feita por técnicas destrutivas e não destrutivas. Dentre os métodos não destrutivos (MND) estão o pachômetro (detector de armaduras), que mede a profundidade das barras e estima o cobrimento e o ultrassom, que avalia a homogeneidade do betão e identifica zonas de cobrimento irregular.

Quanto aos ensaios destrutivos, pode-se citar a medição direta com paquímetro, após a remoção localizada do betão (método preciso, porém invasivo), ou a análise de núcleos extraídos, que permite correlacionar o cobrimento com outras propriedades (porosidade, carbonatação).

Neste contexto, o reparo de estruturas com cobrimento insuficiente é essencial para garantir a durabilidade e a segurança das edificações, e uma das abordagens mais eficazes consiste na aplicação de argamassas de reparo, que podem ser utilizadas sob a forma de

betão projetado ou argamassa polimérica, com o objetivo de recompor a espessura adequada de cobrimento. Em regiões de difícil acesso, materiais tixotrópicos oferecem vantagens significativas, pois mantêm sua forma após a aplicação.

Como proteção complementar, pode-se aplicar revestimentos impermeabilizantes, como resinas epóxi ou poliuretano, que reduzem a penetração de agentes agressivos. Além disso, o uso de inibidores de corrosão aplicados superficialmente é uma estratégia eficaz para preservar as armaduras metálicas.

No contexto da prevenção, um projeto estrutural bem elaborado é a base para garantir a durabilidade. A definição do cobrimento deve estar em conformidade com a classe de agressividade ambiental, conforme indicado na Tabela 7.2 da NBR 6118:2023. A especificação de espaçadores plásticos ou de betão com resistência compatível é indispensável para assegurar o correto posicionamento das armaduras.

Durante a execução, o controle de qualidade é fundamental, destacando-se o uso de gabaritos para a montagem das armaduras e inspeções sistemáticas com pachômetros antes da concretagem, a fim de garantir o cobrimento projetado. Por fim, tecnologias como sensores embutidos permitem o monitoramento do cobrimento em tempo real, enquanto o uso de betão autoadensável reduz falhas de adensamento, frequentemente associadas a problemas de cobrimento.

1.2.3 Contaminação por cloretos

A contaminação por cloretos é uma das principais causas de degradação prematura em estruturas de betão armado, especialmente em ambientes marinhos ou onde são utilizados sais de degelo. Os íons cloreto (Cl^-) penetram na matriz cimentícia, promovem a despassivação da armadura e iniciam processos corrosivos mesmo em condições de alta alcalinidade. Este fenômeno, amplamente estudado em obras costeiras e viadutos (Helene, 1993), exige abordagens multidisciplinares que integrem conhecimento químico, materiais de construção e técnicas de reparo.

Basicamente, os cloretos atingem o betão por três vias principais:

- Difusão: Em ambientes úmidos, os íons Cl^- migram através dos poros do betão, impulsionados por gradientes de concentração. Esse processo é acelerado em betões porosos ou com relação água/cimento (a/c) elevada (Mehta & Monteiro, 2014).

- **Capilaridade:** Em estruturas expostas a ciclos de molhagem e secagem, como por exemplo zonas de marés, a água salina é absorvida pelos capilares do betão, transportando cloretos para o interior.
- **Contaminação Direta:** Uso de agregados marinhos, aditivos contaminados ou água de amassamento com cloretos (>0,4% em massa de cimento, segundo ABNT NBR 6118:2023).

A corrosão inicia-se quando a concentração de cloretos livres na superfície do aço ultrapassa o limiar de 0,4% em massa de cimento (Helene, 1993). Os impactos incluem a corrosão localizada (pites), que são a formação de cavidades profundas na armadura, reduzindo sua seção resistente de forma heterogênea, ou ainda a expansão dos produtos de corrosão, em que ocorre a geração de óxidos com volume 2 a 6 vezes maior que o aço original, causando fissuração e delaminação do betão.

À título de ilustração do grau do dano, é possível dizer que em estruturas marinhas sem proteção a vida útil pode ser reduzida em 50% se a concentração de cloretos atingir 1% próximo à armadura (Tuutti, 1982).

A avaliação da contaminação por cloretos exige uma abordagem sistemática que combine ensaios laboratoriais, técnicas não destrutivas e monitoramento contínuo. O método mais consolidado para quantificar a concentração de cloretos é a análise química de amostras extraídas através de perfurações estratificadas, que permitem determinar o perfil de penetração dos íons ao longo da profundidade do betão. Esse procedimento, normalizado pela NBR 9778/2009 (Argamassa e betão endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica), fornece dados precisos sobre os teores de cloretos livres e totais.

Técnicas não destrutivas têm ganhado destaque pela capacidade de fornecer informações sem danificar a estrutura. A tomografia de resistividade elétrica, por exemplo, permite mapear a distribuição de cloretos com base na condutividade do betão, enquanto sensores eletroquímicos embutidos oferecem medições em tempo real do potencial de corrosão. Esses métodos são particularmente úteis em estruturas críticas, como pontes e viadutos, onde a intervenção precoce é essencial para evitar colapsos progressivos.

O monitoramento contínuo, por sua vez, representa uma evolução significativa na gestão da durabilidade. Sistemas baseados em ânodos de sacrifício ou células de referência podem detectar a ativação da corrosão antes que danos visíveis ocorram, permitindo

intervenções localizadas e reduzindo custos de manutenção. A integração dessas tecnologias com plataformas de *big data* e inteligência artificial tem aberto novas perspectivas para a previsão de vida útil remanescente, especialmente em infraestruturas expostas a ambientes altamente agressivos (Bertolini et al., 2013).

A mitigação dos efeitos da contaminação por cloretos requer intervenções que variam conforme o estágio de degradação. Em estruturas já afetadas, a remoção seletiva do betão contaminado é o primeiro passo, seguida pela limpeza mecânica da armadura e aplicação de inibidores de corrosão, como nitrito de sódio, que reagem com os íons cloretos residuais. A reconstituição do cobrimento com argamassas modificadas por polímeros ou pozolanas é essencial para restaurar a proteção física e química, sendo que sistemas de proteção catódica — por corrente impressa ou anodos de sacrifício — são frequentemente adotados em casos de contaminação severa.

Para novas construções, a prevenção deve ser prioritária, envolvendo a especificação de materiais com baixa permeabilidade, como betões com adições de sílica ativa ou escória de alto-forno, que reduzem a difusão de cloretos. O uso de armaduras não convencionais, como aço inoxidável ou revestido com epóxi, tem se mostrado eficaz em ambientes marinhos, enquanto revestimentos superficiais hidrofóbicos criam uma barreira adicional contra a penetração de íons.

As pesquisas mais recentes apontam para soluções inovadoras, como o desenvolvimento de betões auto curativos, nos quais microcápsulas contendo agentes inibidores são ativadas pela formação de fissuras, liberando compostos que neutralizam os cloretos. Da mesma forma, a utilização de sensores inteligentes embutidos permite o monitoramento em tempo real, transformando estruturas estáticas em sistemas adaptativos capazes de alertar para a necessidade de manutenção antes que danos irreversíveis ocorram. Esses avanços, estão redefinindo os paradigmas da durabilidade no século XXI.

1.2.4 Corrosão das armaduras

A corrosão das armaduras é um dos principais fenômenos patológicos que afetam a durabilidade de estruturas de betão armado, especialmente em ambientes agressivos como zonas costeiras ou regiões urbanas com alta poluição atmosférica. Esse processo, de natureza eletroquímica, compromete não apenas a capacidade estrutural, mas também a segurança e a vida útil das edificações.

A corrosão de armaduras é um desafio multidisciplinar que exige integração entre conhecimento científico, técnicas construtivas e gestão de manutenção. Enquanto métodos tradicionais de reparo focam na correção, a tendência atual privilegia a prevenção através de materiais avançados e monitoramento inteligente, alinhando-se aos princípios da Engenharia da Durabilidade. Estudos recentes, como o uso de fibras de carbono como substitutas do aço ou betão autorregenerativo, apontam para soluções futuras ainda mais robustas.

A corrosão do aço no betão ocorre quando se rompe a camada passiva que naturalmente protege o metal em meio alcalino (pH ~13). Pode-se dizer que são dois os principais mecanismos que explicam essa degradação: o ataque por cloretos, que ocorre principalmente em regiões litorâneas ou onde há aplicação de sais de degelo, os íons cloreto (Cl^-) penetram no betão e atingem a armadura. Mesmo em pH elevado, os cloretos desestabilizam a passivação, provocando corrosão localizada (pites), que avança rapidamente devido à formação de pilhas eletroquímicas (Bertolini et al., 2013).

A carbonatação do Betão, que causa a corrosão do aço, conforme mencionado I.2.1. Além disso, fatores como fissuração do betão, cobrimento insuficiente e exposição a ciclos de umidade e secagem agravam o problema, pois facilitam a penetração de agentes agressivos.

Em geral, a corrosão gera dois efeitos críticos para a estrutura: a redução da seção transversal das barras de aço, diminuindo sua resistência mecânica e a expansão volumétrica dos óxidos de ferro, que exercem pressão sobre o betão, levando a fissuras paralelas à armadura e ao destacamento do cobrimento (delaminação). A perda de apenas 1 mm no diâmetro de uma barra de 10 mm pode reduzir sua capacidade de carga em até 20% (Helene, 1993).

Em casos extremos, como em vigas ou pilares submetidos a cargas elevadas, a corrosão pode precipitar colapsos sem aviso prévio, como evidenciado no desastre do Edifício Liberdade em Santos (2018), onde a corrosão generalizada exigiu demolição emergencial (FOLHA DE S. PAULO, 2018). A Figura 2 mostra um exemplo do impacto da corrosão das armaduras em vigas.

Portanto, a detecção precoce da corrosão é essencial para intervenções eficazes. Além da inspeção visual, como a identificação de manchas de ferrugem e fissuração, técnicas avançadas podem incluir, por exemplo, ensaio de potencial eletroquímico, ou potencial

de meia-célula (método half-cell), que mapeia áreas ativas de corrosão. A Figura 1 apresenta análise da profundidade de carbonatação com fenolftaleína.



Figura 1- Teste com fenolftaleína (MOUTINHO, 2016).



Figura 2 - Corrosão das armaduras - (TERSARIOL, 2017).

As estratégias de intervenção para corrosão em armaduras variam conforme a gravidade e o avanço do processo corrosivo. No entanto, um procedimento genérico frequentemente adotado envolve a remoção do betão deteriorado até a completa exposição do aço em bom estado.

Em seguida, procede-se à limpeza das armaduras por meio de jateamento abrasivo ou escovação mecânica, visando remover produtos de corrosão e garantir aderência. Pode-se aplicar inibidores de corrosão, como o nitrito de sódio, ou revestimentos epoxídicos protetores para restaurar a passivação do aço.

Por fim, a recomposição da seção do elemento estrutural é realizada com argamassas de reparo compatíveis, preferencialmente modificadas com polímeros, garantindo aderência, resistência e durabilidade (HELENE & PEREIRA, 2011).

Como medida preventiva, é essencial que o projeto estrutural atenda rigorosamente às normas técnicas vigentes, contemplando critérios de durabilidade desde a fase de concepção. A seleção de materiais adequados, como o uso de betão de alto desempenho com baixa permeabilidade, contribui significativamente para a proteção das armaduras. Além disso, a aplicação de barreiras físicas eficazes, como revestimentos poliméricos, hidrofugantes ou pinturas protetoras, atua como linha de defesa contra a penetração de agentes agressivos, especialmente em ambientes com elevada agressividade ambiental.

1.2.5 Desagregação

A desagregação do betão caracteriza-se pela perda progressiva de coesão da matriz cimentícia, resultando no destacamento de partículas e, em casos avançados, na exposição da armadura. Este fenómeno patológico, frequentemente observado em estruturas expostas a ambientes agressivos ou submetidas a carregamentos cíclicos, compromete significativamente a durabilidade e a capacidade resistente dos elementos estruturais.

Esta patologia representa um desafio que tem origem em vários fatores e que exige diagnóstico preciso, além de soluções customizadas. Enquanto técnicas convencionais de reparo focam na restauração geométrica, as tendências atuais privilegiam materiais autorregenerativos, aqueles com bactérias produtoras de calcita, ou o uso de sensores embutidos para monitoramento em tempo real, facilitando a identificação precoce do dano.

Um exemplo presente na bibliografia é a análise do cais do Porto de Santos que evidenciou um quadro crítico de desagregação superficial com perda de 5 a 10 mm por ano, causado pela abrasão contínua de sedimentos e ataque químico por sulfatos. A intervenção empregou betão projetado com fibras de aço e aplicação de revestimento de poliuretano, o que resultou na extensão estimada de 25 anos na vida útil da estrutura (EPUSP, 2022).

A desagregação ocorre quando as forças de adesão entre a pasta de cimento e os agregados são superadas por tensões internas ou externas. Esse processo pode ser desencadeado por múltiplos fatores, tais como ciclos de gelo-degelo, ataques por sulfatos, abrasão mecânica e corrosão das armaduras.

Os ciclos de gelo-degelo ocorrem em regiões de clima frio, e a água contida nos poros do betão congela e expande-se cerca de 9% em volume, gerando tensões internas que fragmentam a matriz. A repetição desses ciclos leva à perda progressiva de massa. Já os ataques por sulfatos, compreendem a reação entre os íons sulfato (SO_4^{2-}) e os compostos de cálcio da pasta forma a etringita e a gipsita, cuja expansão causa fissuração e esfarelamento superficial (Skalny et al., 2002).

Quanto a abrasão mecânica, as estruturas sujeitas a tráfego intenso, tais como pavimentos e pisos industriais ou impacto de partículas, como barragens e estruturas costeiras, sofrem erosão acelerada da superfície. Já na corrosão das armaduras, a expansão dos produtos de corrosão gera pressões que desagregam o betão adjacente, criando zonas de delaminação.

A desagregação superficial pode evoluir para danos mais profundos, afetando propriedades importantes dos elementos. A redução da seção resistente em vigas e pilares diminui a capacidade de carga. Uma desagregação de 20 mm em uma viga de 300 mm reduz em aproximadamente 15% sua resistência à flexão (Bentur et al., 1997).

A exposição da armadura e a perda de estanqueidade, em que a impermeabilização fica comprometida a penetração de agentes corrosivos é facilitada, acelerando a degradação. Desse modo, o acompanhamento do elemento comprometido é essencial.

A avaliação da desagregação requer abordagens que podem passar tanto por ensaios não destrutivos, como é o caso do Martelo de Schmidt, que mede a dureza superficial (ASTM C805) e o ultrassom, que identifica zonas de descompactação (ASTM C597), e, em último caso, ensaios destrutivos, a exemplo da análise de núcleos, que determina a profundidade do dano e propriedades mecânicas residuais, e a microscopia eletrônica, que revela micro trincas e alterações na interface pasta-agregado.

Quanto ao reparo aos danos causados pela desagregação, inicialmente é necessária a preparação do substrato, onde é feita a remoção do betão desagregado até atingir material saudável, por meio do jateamento ou britagem. Em seguida, deve-se fazer a reconstituição do elemento danificado, o que pode ser feito com a aplicação de argamassas tixotrópicas, para pequenas espessuras, ou em betão projetado, quando se trata de grandes volumes.

Vencidas estas etapas, deve ser feita a proteção da superfície, por meio de revestimentos com resinas epóxi, que tem alta resistência química, ou impermeabilizantes cristalizantes, geralmente utilizados em ambientes úmidos.

Importante destacar que medidas preventivas podem e devem ser tomadas, como por exemplo, o uso de aditivos incorporadores de ar, para resistência ao gelo, ou uso de cimentos tipo V, em ambientes expostos a sulfatos ainda na formulação do betão, ou mesmo o aumento do cobrimento em zonas de impacto e drenagem adequada para evitar a saturação são medidas que podem ser tomadas ainda na fase de projeto.

1.2.6 Desplacamento

O destacamento do betão constitui uma das manifestações patológicas mais graves em estruturas de betão armado, caracterizando-se pela separação física entre a pasta de cimento e os agregados ou pela perda de aderência entre o betão e a armadura. Este fenômeno, que frequentemente antecede o colapso parcial de elementos estruturais,

assume particular relevância em obras de grande porte como pontes, barragens e edifícios altos.

O fenômeno também conhecido como deslocamento no betão estrutural decorre de complexas interações físico-químicas que comprometem progressivamente a integridade do sistema compósito. Observa-se frequentemente a formação de microfissuras, agravadas por processos expansivos associados à reação álcali-agregado ou à cristalização de sais nos poros capilares. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) demonstra que estes mecanismos se iniciam na nanoescala, evoluindo para descontinuidades macroscópicas após ciclos repetidos de umedecimento e secagem (Mehta, 2014).

No que concerne à interface aço-betão, a degradação da aderência manifesta-se predominantemente através de três vias complementares: (i) redução do pH da solução intersticial por carbonatação, (ii) formação de óxidos expansivos decorrentes da corrosão eletroquímica, e (iii) fadiga mecânica em regiões submetidas a carregamentos cíclicos.

Como efeito, a perda de aderência entre os componentes do betão armado desencadeia uma cascata de efeitos estruturais que comprometem significativamente a segurança e funcionalidade das edificações. As análises numéricas mediante método dos elementos finitos (MEF) demonstram que o deslocamento altera substancialmente o diagrama momento-curvatura de elementos fletidos, com redução característica da ductilidade e aumento da flecha em serviço.

Em elementos submetidos a esforços cortantes, a degradação da interface agregado-pasta reduz a eficiência do mecanismo de engrenamento, levando a concentrações de tensão que precipitam a formação de fissuras diagonais.

O caso paradigmático do colapso do viaduto Morandi em Génova (2018) ilustra dramaticamente as consequências do deslocamento não detectado. Investigações pós-colapso identificaram que o processo degenerativo se iniciou com a perda de aderência nos cabos de pretensão, evoluindo para uma falha em cadeia que não foi captada pelos sistemas convencionais de inspeção. Este evento catalisou a revisão dos protocolos de monitoramento estrutural em toda a União Europeia, com ênfase no desenvolvimento de técnicas não destrutivas baseadas em inteligência artificial (Bianchini et al., 2022).

A detecção requer abordagem multitecnológica como MDN (método não destrutivo) e ensaios destrutivos controlados. Destacam-se entre os métodos não destrutivos o da

termografia infravermelha que é referenciada no ASTM D4788, por meio do qual podem ser detectadas variações de capacitância térmica em zonas deslocadas. Dentre ensaios Destrutivos Controlados, pode-se citar o Teste Pull-Out (EN 12504-3) que mede a tensão de aderência residual e a análise petrográfica que caracteriza zonas de possíveis falhas.

As intervenções em estruturas de betão danificadas incluem métodos convencionais, como a injeção de resinas epóxi com módulo ajustado, eficazes no preenchimento de fissuras e reconstituição da monoliticidade (HELENE & ANDRADE, 1993).

1.2.7 Desvio Geométrico

Os desvios geométricos em estruturas de betão armado representam uma problemática que transcende questões dimensionais, constituindo-se como um desafio complexo que envolve aspectos técnicos, gerenciais e de controle de qualidade. Como observado por Melchers (2019), essas irregularidades frequentemente funcionam como indicadores precoces de problemas sistêmicos no processo construtivo, podendo evoluir para comprometimentos significativos da capacidade estrutural quando não adequadamente identificados e corrigidos.

A gênese dos desvios geométricos pode ser compreendida através de uma abordagem sistêmica que considera três eixos principais de influência. No âmbito do projeto, destacam-se as incompatibilidades entre diferentes disciplinas projetuais, particularmente nos casos em que soluções estruturais inovadoras não são adequadamente detalhadas. Como demonstrado no estudo de caso do Edifício Infinity em Tóquio (Tanaka et al., 2020), mesmo variações aparentemente insignificantes nos desenhos de arranjo de armaduras podem resultar em desvios cumulativos durante a execução.

O processo executivo apresenta como principais fatores contribuintes o deslocamento de armaduras durante a concretagem, frequentemente associado à utilização de espaçadores em quantidade ou resistência mecânica insuficiente, a deformação plástica das fôrmas, especialmente em elementos de grande pé-direito, e ainda erros de prumada e nivelamento decorrentes de metodologias de medição inadequadas.

A análise dos efeitos dos desvios geométricos revela consequências multidimensionais. Do ponto de vista mecânico-estrutural, as excentricidades não previstas alteram significativamente o diagrama de interação de elementos comprimidos.

Quando se trata de durabilidade, a redução do cobrimento efetivo decorrente do deslocamento de armaduras acelera os processos de degradação. Dados coletados em estruturas costeiras brasileiras (Lopes et al., 2022) evidenciam que desvios médios de 15mm no posicionamento de armaduras podem antecipar em 7-10 anos o início dos processos corrosivos. Na Figura 3 pode-se observar a presença de desvios geométricos nas vigas, os quais se encontram em desacordo com os parâmetros estabelecidos no projeto estrutural. Tais desvios podem comprometer a distribuição adequada dos esforços, a estética da estrutura e, em casos mais graves, a sua segurança e funcionalidade.



Figura 3 - Vigas com desvio geométrico (FERRAZ, 2003).

A título de monitoramento, a detecção e caracterização de desvios geométricos tem evoluído significativamente com a incorporação de tecnologias digitais. A fotogrametria computacional por exemplo, quando associada a algoritmos de visão artificial, permite a reconstrução tridimensional precisa da geometria executada. Como demonstrado no projeto de *retrofit* da Ponte Rio-Niterói (2023), esta técnica alcançou precisão milimétrica na identificação de distorções.

Alternativamente, o escaneamento a laser (LiDAR) destaca-se na avaliação de grandes estruturas, possibilitando a comparação automática entre o as-built e o projeto original através de softwares BIM especializados. De acordo com Zhang et al. (2023) estudos indicam redução de 80% no tempo necessário para inspeções completas.

As abordagens contemporâneas para mitigação de desvios geométricos adotam uma perspectiva preventiva e corretiva integrada. Para intervenções corretivas, destacam-se tanto técnicas de reforço estrutural adaptativo que consideram as excentricidades existentes como a utilização de compósitos de CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) para compensação de irregularidades.

Na esfera preventiva, pode-se optar pela implementação de sistemas de controle dimensional automatizados, adoção de plataformas BIM para detecção prévia de incompatibilidades e a capacitação continuada de equipes de execução.

1.2.8 Eflorescência

A eflorescência em estruturas de betão é caracterizada pelo surgimento de manchas esbranquiçadas na superfície, resultantes da migração de sais solúveis, especialmente compostos de metais alcalinos e alcalino-terrosos, transportados pela água que penetra no material. À medida que essa água alcança a superfície e evapora, os sais cristalizam e se depositam, formando o aspecto típico da patologia. Embora frequentemente classificada como uma manifestação estética, sua presença pode indicar elevada porosidade ou problemas de infiltração (BERTOLINI, 2010).

Os principais fatores que favorecem a ocorrência da eflorescência incluem a exposição prolongada à umidade, elevada porosidade do betão e variações térmicas que aceleram a evaporação da água. É possível verificar na Figura 4 resultado aparente desta patologia. Para mitigar esse tipo de degradação, recomenda-se a incorporação de aditivos impermeabilizantes ou redutores de porosidade, além de um adensamento eficaz durante a concretagem. Essas medidas diminuem a permeabilidade superficial e, portanto, o transporte de sais para a superfície.



Figura 4 - Eflorescência (hrpremo.com.br)

O estudo das eflorescências no betão vem evoluindo rapidamente, impulsionado pelos avanços nas ciências dos materiais e nas tecnologias de caracterização. As tendências apontam para o desenvolvimento de modelos preditivos sofisticados, capazes de antecipar o comportamento do material em diferentes condições ambientais.

Materiais auto adaptativos e sistemas inteligentes de monitoramento representam as fronteiras mais promissoras na busca por soluções duradouras para esse desafio histórico da construção civil. A integração dessas tecnologias com os princípios da construção sustentável certamente moldará o futuro do betão durável.

Quanto às causas, o processo de formação das eflorescências envolve uma sequência bem definida de mecanismos interdependentes. Inicialmente, ocorre a solubilização de compostos iônicos presentes na matriz cimentícia. Os íons mobilizados são então transportados para a superfície através do sistema capilar do betão, onde a subsequente evaporação da água desencadeia a cristalização dos sais.

Esse mecanismo de transporte e deposição é particularmente influenciado pela microestrutura porosa do material. Pesquisas recentes utilizando micro tomografia de raio X revelaram que a cinética do processo varia significativamente em função da distribuição e conectividade dos poros, demonstrando uma relação exponencial entre a velocidade de ascensão capilar e o diâmetro médio dos poros (Cnudde et al., 2020).

As consequências da eflorescência manifestam-se em diferentes escalas de observação. Na escala microscópica, estudos utilizando microscopia eletrônica de varredura ambiental têm demonstrado alterações significativas na microestrutura superficial do betão, com consequente redução da resistência mecânica localizada.

Em nível macroscópico, os principais efeitos incluem a degradação acelerada de revestimentos devido à perda de aderência e o aumento da susceptibilidade a outros mecanismos de degradação, como os ciclos de gelo-degelo em regiões de clima frio. A pressão gerada pelo crescimento cristalino no interior dos poros, que pode ultrapassar 30 MPa conforme simulações computacionais de Derluyn et al. (2019), representa um fator adicional de preocupação para a integridade estrutural.

O desenvolvimento de técnicas analíticas sofisticadas tem revolucionado o estudo dessa patologia. Ensaio acelerados, particularmente os que envolvem ciclos controlados de umedecimento e secagem, têm se mostrado valiosos para a avaliação da susceptibilidade de diferentes formulações de betão ao fenômeno. Esses métodos, quando combinados com técnicas avançadas de imagem, proporcionam uma compreensão abrangente dos mecanismos envolvidos.

Como forma de mitigação das eflorescências, as novas abordagens baseiam-se na formulação otimizada do betão, com ênfase na redução da permeabilidade através da

utilização de adições minerais como a sílica ativa e o metacaulim, se torna a primeira linha de defesa contra o problema. O desenvolvimento de tratamentos superficiais inovadores, particularmente os baseados em hidrofugantes de silano-siloxano e revestimentos fotocatalíticos autolimpantes, demonstram eficácia significativa na prevenção do fenómeno.

1.2.9 Falhas na concretagem

A qualidade da concretagem é um fator determinante para a durabilidade e desempenho estrutural do betão armado. Quando esse processo não é executado adequadamente, podem surgir defeitos que comprometem a integridade da estrutura, levando a patologias precoces e elevados custos de reparação. Entre as falhas mais comuns, destacam-se a segregação, armadura exposta. Como se pode notar na Figura 5, a fissuração plástica e a exsudação excessiva, problemas frequentemente associados a erros na dosagem, no lançamento ou na compactação do betão (Mehta & Monteiro, 2014).



Figura 5 - Falha de concretagem (AECweb, 2021)

As falhas de concretagem podem ser atribuídas a diversos fatores, que podem ser divididos em materiais e executivos. Os fatores materiais abrangem uma elevada relação água/cimento (a/c), que aumenta a fluidez do betão, mas também a exsudação e a porosidade, reduzindo sua resistência final (Mehta & Monteiro, 2014), e a granulometria inadequada dos agregados, que pode levar a uma má distribuição dos componentes, favorecendo a segregação (Neville, 2011).

Quanto aos fatores executivos, pode-se citar o adensamento insuficiente, quando a falta de compactação adequada resulta em vazios e reduz a resistência mecânica do betão (ACI 309R-24), a queda livre excessiva durante o lançamento do betão, que provoca a separação dos agregados, aumentando o risco de segregação (Eurocódigo 2, 2004), e ainda a cura inadequada, quando a alta temperatura e baixa umidade relativa do ar acelera

a evaporação da água, levando à fissuração plástica (ACI 305R-10) pois intensifica a retração superficial.

As falhas no processo de concretagem representam muito mais que simples imperfeições superficiais, elas comprometem diretamente a capacidade estrutural e a durabilidade das construções em betão armado. Quando ocorre segregação devido a quedas livres excessivas no lançamento ou tempo prolongado de transporte, os efeitos são palpáveis: a resistência à compressão pode cair até 30%, enquanto a permeabilidade aumenta cinco vezes, criando zonas frágeis que concentram tensões e aceleram processos degradativos (Mehta & Monteiro, 2014).

As concentrações de brita, frequentemente causadas por vibração inadequada ou espaçamento insuficiente entre armaduras, trazem consequências ainda mais graves. Elas reduzem em 40% a aderência aço-betão, criando pontos vulneráveis à corrosão que comprometem a capacidade de carga localizada (ACI 318-19). Já a fissuração plástica, decorrente de evaporação acelerada ou cura inadequada nas primeiras 24 horas, abre caminhos para penetração de cloretos, podendo reduzir a vida útil da estrutura pela metade em ambientes agressivos (EN 206, 2013).

Além disso, a exsudação excessiva, produto de relações água/cimento elevadas ou cimentos mal dosados podem formar uma camada superficial até 20% menos resistente, enquanto a porosidade descontrolada - fruto de adensamento deficiente ou uso incorreto de aditivos - triplica a absorção capilar e diminui a proteção às armaduras. Esses problemas combinados podem reduzir a vida útil projetada em 30 a 60%, com custos de reparação que frequentemente quintuplicam o valor da construção original (Helene, 1997). O controle rigoroso em todas as fases da concretagem mostra-se, portanto, não apenas recomendável, mas essencial para garantir a segurança e economicidade das estruturas.

Diversas técnicas podem ser empregadas para identificar e avaliar as falhas de concretagem, dependendo da natureza do problema. Os Ensaio Não Destrutivos (END) são opções, como os já citados ultrassom e martelo de Schmidt (esclerometria), ou ainda os ensaios destrutivos que optam pela extração de testemunhos fornecendo dados precisos sobre a resistência real do betão.

Ainda são opções a Inspeção Visual e o Mapeamento de Fissuras, para os quais normas como a ACI 224.1R-07 oferecem diretrizes para essa classificação e análise, auxiliando na determinação de suas causas.

Contudo, a prevenção se mostra um caminho mais eficaz, e, para que as falhas de concretagem sejam impedidas, torna-se necessária uma abordagem integrada, que combine as melhores práticas. Tanto o ACI 304R-00 (EUA) quanto a NBR 14931:2023 (Inspeção predial - Procedimento) estabelecem diretrizes fundamentais para o lançamento adequado do betão, limitando a queda livre a 1,5m e exigindo o uso de trombas ou mangotes quando este limite é excedido. Esta convergência normativa destaca a importância universal deste parâmetro para evitar segregação.

Na formulação do traço, enquanto a NBR 12655:2022 recomenda relações água/cimento inferiores a 0,50, o Eurocódigo 2 (2004) apresenta critérios complementares para dosagem, reforçando a necessidade de balancear trabalhabilidade e resistência. Para melhores diagnósticos das falhas, a NBR 7680-1:2015 (Inspeção de Estruturas) complementa os métodos do ASTM C597 (Ultrassom) e ASTM C805 (Esclerometria), criando um protocolo abrangente de avaliação.

1.2.10 Fissuras e trincas

A fissuração é uma das manifestações patológicas mais frequentes em estruturas de betão armado. Embora nem toda fissura represente risco imediato à estabilidade estrutural, sua presença pode indicar problemas de origem construtiva, projetual ou de uso, além de comprometer aspectos funcionais, estéticos e de durabilidade da edificação.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), as fissuras podem ser classificadas conforme sua origem: fissuras estruturais, relacionadas à atuação de cargas, que abrangem a flexão, o cisalhamento e a torção; fissuras não estruturais, associadas a retração, variações térmicas, movimentações diferenciais e deformações impostas, e fissuras de origem construtiva, que decorrem de procedimentos inadequados de execução.

A NBR 6118:2023 estabelece limites de largura de fissura em função da classe de agressividade do ambiente, até 0,5 mm de espaçamento, podendo ainda ser classificada como microfissura as de abertura menor que 0,05mm. De acordo com a mesma norma, aberturas que variam entre 0,5 mm e 1 mm são denominadas trincas. As fissuras

excessivas favorecem a penetração de agentes agressivos e reduzem a vida útil da estrutura.

A ocorrência precoce de fissuras está fortemente associada à ausência de juntas de dilatação, armaduras insuficientes, cobrimentos inadequados e falhas na cura do betão, mas não se limita a isto, uma vez que podem ocorrer falhas de projeto, sobrecargas não previstas e recalques diferenciais. O Quadro 1 apresenta algumas possíveis causas de fissuras e trincas.

Assentamento Plástico	Movimentação Higroscópica	Concentração de tensões	Alteração Química dos Materiais
Movimentação de Formas	Movimentação Térmica	Recalque da Fundação	Escoramento Insuficiente
Dessecação Superficial	Deformabilidade Excessiva	Corrosão de Armaduras	Falta de junta de Dilatação
Vibrações	Esforços de flexão e Cisalhamento	Retração Hidráulica	Betão de baixa Resistência

Quadro 1 - Agente causadores de fissuras (Schmidt & Lima, 2017)

A fissuração em estruturas de betão armado pode comprometer significativamente seu desempenho mecânico, durabilidade e segurança. Do ponto de vista estrutural, fissuras extensas ou mal posicionadas podem provocar redistribuição indesejada de esforços, perda de rigidez e até instabilidade localizada. Em termos de durabilidade, elas atuam como vias de entrada para agentes agressivos, como água, dióxido de carbono e cloretos, que aceleram processos de degradação, especialmente a corrosão das armaduras. Além disso, fissuras visíveis afetam a estética da edificação e podem gerar insegurança aos usuários. Em casos severos, comprometem a estanqueidade, causam infiltrações e reduzem drasticamente a vida útil do betão armado.

O monitoramento da abertura, profundidade e evolução das fissuras é essencial para avaliar a necessidade de intervenção. A fissuração, quando não devidamente controlada, assume um carácter progressivo que amplifica os seus efeitos negativos ao longo do tempo. Esta progressividade exige uma abordagem proativa, integrando critérios normativos, como os limites de abertura de fissuras do Eurocódigo 2, com tecnologias de monitorização, como por exemplo os sensores de deformação, garantindo a sustentabilidade técnica e financeira das estruturas.

A identificação e o acompanhamento destas patologias são essenciais para a avaliação da integridade estrutural. A escolha do método depende da natureza da fissura, se ativa ou passiva, da sua largura e profundidade. A aplicação de técnicas eficazes tanto para o reparo quanto para a prevenção prolonga a vida útil dos elementos, e consequentemente, do edifício.

Portanto, os reparos devem considerar a origem e a severidade da fissura, e as melhores soluções devem ser avaliadas, que vão desde a injeção de resinas epóxi para fissuras estruturais até a selagem com mastiques, caso sejam fissuras superficiais. Em situações mais críticas, pode-se recorrer à aplicação de compósitos reforçados com fibras (CFRP).

A prevenção depende de boas práticas em todas as etapas do ciclo de vida da edificação. Desde projetos compatibilizados, controle da retração do betão, detalhamento adequado das armaduras, execução tecnicamente supervisionada e manutenção periódica. Como ressaltado por Helene & Pereira (2011), a prevenção é sempre mais eficaz e econômica que a correção de danos já instaurados.

1.2.11 Flechas excessivas

As flechas excessivas em estruturas de betão armado representam uma das manifestações patológicas mais frequentes na prática da engenharia civil contemporânea. Como destacado por Ghali et al. (2022), esse fenômeno transcende a mera questão estética, podendo comprometer a funcionalidade da edificação e, em casos extremos, sua segurança estrutural. A presente análise aborda o tema sob uma perspectiva integrada, considerando os aspectos teóricos, normativos e práticos envolvidos no controle de deformações em elementos fletidos, com base nas recomendações da ABNT NBR 6118 (2023) e nos avanços recentes no campo da mecânica das estruturas (Bischoff, 2021).

O comportamento deformacional das estruturas de betão armado é regido por três componentes fundamentais, a deformação elástica inicial, que é determinada pelas propriedades mecânicas dos materiais e pela geometria da seção transversal. Estudos experimentais demonstram que esta parcela pode representar entre 20% e 40% da flecha total em elementos convencionais (Bazant & Baweja, 2020).

Outro componente é a deformação por fluência, que é um processo que depende do tempo que ocorre sob carregamento sustentado. De acordo com Wendner et al., (2019) modelos reológicos avançados revelaram que a fluência pode ampliar as deformações

iniciais em até 300% em períodos de 50 anos. E, por fim, a deformação por retração, que é um fenômeno volumétrico associado à perda de umidade do betão. Conforme Gilbert & Ranzi (2021) este efeito é particularmente significativo em elementos com elevada relação volume/superfície.

A magnitude das flechas excessivas está intrinsecamente relacionada a fatores como propriedades dos materiais, as características geométricas e as condições ambientais. A NBR 6118:2023, recomenda valores limites entre 10 e 25 para relação vão/altura (l/d) para vigas convencionais, com intuito de fazer o controle dessas deformações.

Quanto às condições ambientais, é notório que a humidade relativa do ambiente afeta significativamente os processos de fluência e retração. De acordo com Gardner & Lockman (2020) podem ser observadas diferenças de até 50% nas flechas finais entre ambientes secos ($UR < 40\%$) e úmidos ($UR > 80\%$).

A avaliação das flechas excessivas em estruturas de betão armado requer uma abordagem combinada entre técnicas experimentais, modelagem computacional e verificação normativa. O monitoramento em campo pode ser realizado por meio de deflectômetros a laser e estações totais, permitindo a mensuração precisa das deformações ao longo do tempo. Em aplicações mais sofisticadas, sensores ópticos do tipo Fiber Bragg Grating (FBG) possibilitam o registro contínuo de deformações e variações térmicas com alta sensibilidade, integrando-se a sistemas de monitoramento estrutural permanente.

No âmbito computacional, destacam-se as simulações com elementos finitos tridimensionais que incorporam efeitos de fluência e retração, por meio de modelos viscoelásticos não-lineares. Estas análises são fundamentais para prever o comportamento diferido da estrutura sob carregamentos permanentes. Paralelamente, deve-se fazer a verificação dos limites de deformação estabelecidos por normativas, como a ABNT NBR 6118:2023, e realizar comparações com critérios internacionais, como os propostos pelo Eurocódigo 2 e ACI 318.

O controle das flechas excessivas pode ser abordado tanto de forma preventiva quanto corretiva. No projeto, estratégias como a redução da relação vão/altura (l/d), a adoção de betão de alto desempenho (CAD) e a inclusão de armaduras de pele adicionais são eficazes para minimizar deformações excessivas. O uso de modelos de cálculo que consideram a fluência e retração desde a fase de concepção estrutural é essencial para maior previsibilidade do comportamento.

Nas intervenções corretivas, destacam-se as técnicas de reforço com compósitos de fibra de carbono (CFRP), os quais são aplicados por colagem com adesivos epoxídicos e atuam como armaduras externas de alto módulo. A consideração de contraflechas previamente calculadas pode restabelecer a geometria desejada, enquanto a injeção de resinas estruturais em fissuras localizadas contribui para a redistribuição de esforços e recuperação da rigidez. Finalmente, a integração de tecnologias digitais, como o uso de sensores em sistemas IoT e a modelagem BIM preditiva, oferece uma nova fronteira para o acompanhamento e mitigação proativa de deformações excessivas.

1.2.12 Impermeabilização deficiente

A impermeabilização inadequada em estruturas de betão armado configura-se como uma das principais causas de patologias na construção civil, com impactos significativos na durabilidade e segurança das edificações. De acordo com pesquisas do Instituto Brasileiro de Betão, aproximadamente 40% dos casos de degradação prematura em estruturas de betão estão relacionados a falhas nos sistemas de proteção contra umidade (IBRACON, 2023). A norma brasileira NBR 9575 destaca que a maioria desses problemas decorre de falhas na especificação ou execução, e não propriamente na qualidade dos materiais empregados.

Os processos de falha na impermeabilização ocorrem por conta de mecanismos como difusão, capilaridade e ruptura mecânica. A difusão de íons cloreto e dióxido de carbono através da matriz porosa do betão acontece de forma gradual, comprometendo a proteção das armaduras (Mehta & Monteiro, 2014). Simultaneamente, a ascensão capilar de águas subterrâneas introduz sais minerais que cristalizam nos poros do material, gerando tensões internas que podem ultrapassar 20MPa, já explicitado na NBR 9779. Quando combinados com movimentações estruturais não previstas, estes processos levam à formação de microfissuras que aceleram exponencialmente a degradação.

As origens dessas falhas dependem de vários fatores, dentre eles a incompatibilidade química entre materiais e a preparação inadequada do substrato. O ACI identifica que 45% dos problemas de aderência decorrem da aplicação sobre superfícies com umidade superior a 4% ou contaminadas. Outros fatores críticos incluem a variação dimensional do substrato não considerada em projeto, a espessura irregular da camada aplicada e as condições climáticas adversas durante a execução (NBR 9575:2010).

As consequências práticas dessas falhas são severas e mensuráveis. Estruturas com impermeabilização deficiente apresentam taxas de corrosão até sete vezes maiores que o previsto, reduzindo a vida útil em até 70% (CBCS, 2023). Em ambientes industriais ou marítimos, esse quadro se agrava consideravelmente, com processos corrosivos capazes de comprometer a capacidade estrutural em menos de uma década. Além disso, os custos de reparo decorrentes dessas degradações são frequentemente muito superiores ao investimento inicial, representando um impacto econômico significativo para o setor da construção civil.

Neste cenário, o monitoramento contínuo dos sistemas de impermeabilização se torna essencial para a gestão da durabilidade estrutural, permitindo a detecção precoce de falhas e a otimização de intervenções corretivas. As abordagens não destrutivas integradas com tecnologias de sensoriamento avançado, criam sistemas de alerta precoce que podem estender significativamente a vida útil das estruturas.

Dentre as técnicas convencionais de monitoramento pode-se citar a inspeção visual sistemática, quando realizada por profissionais qualificados seguindo protocolos como o estabelecido pela NBR 16747:2020 (Inspeção de Estruturas), que continua sendo o primeiro nível de detecção. Complementarmente, métodos como o teste de humidade por carbureto (ASTM F2170) e a termografia infravermelha (ASTM D4788) permitem quantificar parâmetros críticos sem danificar a estrutura. Adicionalmente, a norma brasileira NBR 15575 estabelece parâmetros referenciais para avaliação periódica do desempenho de sistemas de impermeabilização em edificações habitacionais.

A abordagem para diagnóstico e prevenção deve ser igualmente abrangente. A termografia infravermelha (ASTM D4788) e ensaios de absorção capilar (NBR 9779:2012) permitem a detecção precoce de falhas. Para prevenção, a impermeabilização integral (NBR 16097:2012) combinada com sistemas de drenagem adequados configura a estratégia mais eficaz. Técnicas inovadoras como o monitoramento contínuo com sensores eletroquímicos (ACI 364.1R) e a aplicação de membranas elastoméricas de alta resistência representam avanços significativos no combate a estas patologias.

1.2.13 Infiltração

A infiltração de água em estruturas de betão armado configura-se como uma das principais causas de degradação, dada sua ação progressiva e silenciosa. Este fenômeno

ocorre devido à penetração de água, sob diferentes estados, líquido ou vapor, por meio da porosidade do betão, de microfissuras e interfaces entre diferentes materiais, além de falhas de execução. Os principais mecanismos envolvidos incluem a absorção capilar, responsável pela movimentação da água em ambientes não saturados, a permeação por pressão hidrostática, comum em fundações e reservatórios, a difusão de íons dissolvidos, como cloretos e sulfatos e, por fim, a percolação gravitacional, típica em superfícies horizontais com fissuras abertas.

O ingresso de água na matriz cimentícia pode provocar lixiviação de compostos solúveis, especialmente o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), levando à fragilização estrutural da matriz e à formação de caminhos preferenciais para novas infiltrações. Esse processo é frequentemente agravado em ambientes agressivos, como regiões litorâneas ou industriais, nos quais há maior concentração de íons deletérios. A ação combinada da água e desses agentes químicos potencializa reações como a corrosão das armaduras, a formação de produtos expansivos como óxidos metálicos, sulfato de cálcio e gel de sílica e a fissuração induzida.

A heterogeneidade natural do betão, aliada à presença de falhas construtivas e à elevada porosidade superficial, dificulta o diagnóstico precoce e favorece a degradação progressiva. A infiltração não apenas compromete a integridade física da estrutura, mas também reduz sua vida útil e eleva os custos de manutenção e reabilitação. A Figura 6 exemplifica esta patologia.



Figura 6 – Laje com infiltração (Macre Engenharia, 2022)

Majoritariamente, as infiltrações decorrem de falhas de impermeabilização, concretagem deficiente, ausência de juntas adequadas ou execução de baixa qualidade. A elevada porosidade superficial e a carbonatação avançada também intensificam o problema

(HELENE & PEREIRA, 2011). Fatores como elevada pluviosidade, variações térmicas acentuadas e pressão hidrostática constante aceleram o ingresso de água.

Deve-se atentar para o fato de que a infiltração contínua compromete a alcalinidade do betão, desencadeando a corrosão das armaduras, a lixiviação de hidróxidos de cálcio e a formação de eflorescências. Estruturalmente, isso pode gerar expansão dos ferros, destacamento do cobrimento, redução da seção resistente e fissuração generalizada (FARIA et al., 2008).

A fim de se monitorar estas patologias, são utilizados ensaios de umidade por método de Karsten, mapeamento térmico por termografia infravermelha, inspeção visual em dias de chuva, medição de pH em pontos de entrada e testes com corantes traçadores. Em estruturas críticas, pode-se empregar sensores de umidade embutidos e sistemas IoT para alerta precoce (MALHOTRA & CARINO, 2004).

Já o tratamento exige a identificação da fonte, a remoção de revestimentos deteriorados, a secagem da estrutura, e a aplicação de impermeabilizantes cimentícios ou poliuretânicos. Injeções com gel acrílico ou resinas hidrorreativas são eficazes para selar trincas ativas. A prevenção demanda detalhamento adequado de impermeabilizações, uso de betões com baixa relação a/c e proteção de elementos expostos (NBR 9575:2010).

1.2.14 Obstrução das juntas de dilatação

As juntas de dilatação são dispositivos indispensáveis em estruturas de betão de grande porte ou expostas a variações térmicas significativas. Elas têm como função absorver movimentos relativos entre partes distintas da estrutura, originados por dilatação térmica, retração por secagem, movimentações de recalque diferencial ou ações sísmicas. Quando essas juntas são obstruídas, perdem sua capacidade funcional e passam a representar pontos de concentração de tensões internas, resultando em patologias muitas vezes graves e de difícil reversão.

A obstrução pode ser causada por preenchimento inadequado durante a execução, deposição de resíduos sólidos ou materiais rígidos, ou ainda pela ausência ou degradação dos elementos flexíveis de vedação, como mastiques, neoprenes ou selantes elastoméricos. Em casos recorrentes, a obstrução é invisível à inspeção superficial, sendo identificada apenas após manifestações de deslocamento indevido, fissuração ou falhas nos acabamentos adjacentes. O betão que, por erro de execução, preenche parcialmente a

junta ou o selante que perde elasticidade ao longo do tempo deixam a estrutura vulnerável à imposição de esforços para os quais ela não foi dimensionada.

A consequência direta desse bloqueio é a transferência de esforços indesejados entre blocos estruturais independentes, anulando o objetivo original da junta. A dilatação ou contração térmica, ao encontrar resistência na junta obstruída, gera tensões internas que podem causar fissuras longitudinais, descolamento de pisos, empolamento de revestimentos cerâmicos e até mesmo deslocamentos em apoios e ligações articuladas. Em estruturas com juntas sujeitas à movimentação significativa, como passarelas e pontes, o comprometimento do dispositivo de dilatação pode levar à perda de integridade do sistema estrutural, com implicações para a segurança da obra.

Portanto, o correto dimensionamento, execução e manutenção das juntas de dilatação é uma condição essencial para o desempenho global da estrutura, especialmente em sistemas que necessitam manter estanqueidade, movimentação controlada e integridade dos revestimentos.

As causas mais comuns envolvem a ausência de manutenção preventiva, projeto deficiente que omite dispositivos de proteção, como por exemplo capas de alumínio e bandas elastoméricas, concretagem excessiva ou acúmulo de sujeiras. Além disso, alterações térmicas significativas em estruturas rígidas e contínuas, como pontes ou reservatórios, acentuam os efeitos negativos da obstrução (GHOSH, 2010).

A obstrução das juntas de dilatação impede a movimentação para que foram planejadas, gerando tensões internas elevadas. Isso pode resultar em fissuração longitudinal, destacamento de revestimentos, bem como falhas em apoios ou colapso localizado. Há também comprometimento da estanqueidade e da estética do sistema estrutural.

A avaliação se dá por meio de inspeção visual detalhada, medições de deslocamento relativo com extensômetros, termografia para detecção de anomalias e utilização de boroscópios para análise interna de juntas. Em estruturas monitoradas, sensores de deslocamento e deformação devem ser utilizados (SINGH et al., 2020).

A intervenção para resolução deste problema exige a desobstrução manual ou mecânica da junta com posterior instalação de materiais compressíveis apropriados, bem como a aplicação de selantes flexíveis. Caso necessário, pode-se realizar o recorte da junta e reinstalação de perfis elastoméricos. Considerando-se a prevenção desde o projeto, o ideal é que seja feito um bom detalhamento, escolha de materiais com módulo adequado e

inspeções periódicas com planos de manutenção preditiva conforme orientado pela ACI 504R-90.

1.2.15 Recalques

Os recalques correspondem a assentamentos diferenciais das fundações, que podem ocorrer imediatamente após a construção ou desenvolver-se progressivamente ao longo do tempo, até que se consolide. Segundo a NBR 6122:2019, este fenômeno tem origem em quatro causas principais: estudo geotécnico insuficiente ou incorreto, cargas aplicadas superiores à capacidade de carga do solo, erros de dimensionamento estrutural, ou falhas executivas nas fundações. A Figura 7 ilustra claramente esse fenômeno:

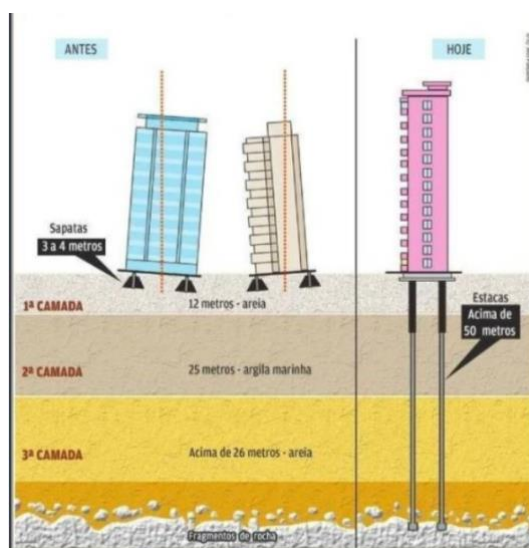


Figura 7 - Recalque ilustrativo (petcivilem.com, 2014)

Os recalques podem ser classificados conforme seu mecanismo físico e evolução temporal. Podem ser recalques imediatos ou elásticos, quando ocorrem durante ou logo após a construção, decorrentes da deformação elástica do solo sob carga. Estes são geralmente uniformes e previsíveis através de ensaios edométricos.

Já os recalques por adensamento resultam da expulsão gradual de água dos vazios do solo, podendo levar meses ou anos para se estabilizarem. A velocidade depende da permeabilidade do solo e da espessura da camada compressível (Teoria de Terzaghi). É possível se observar ainda recalques por fluência, que continuam após a dissipação total do excesso de poropressão, devido ao rearranjo das partículas do solo. São críticos em solos orgânicos ou altamente plásticos.

As causas principais envolvem características do solo, como baixa capacidade de suporte, presença de camadas compressíveis, variações no lençol freático e atividade sísmica. Sobrecargas não previstas, mudanças no uso da edificação e remoção ou adição de cargas locais também agravam o problema (ANDRADE & D'ANDREA, 2010). Projetos que não realizam sondagens geotécnicas detalhadas assumem o risco de recalques inesperados.

As fissuras diagonais em alvenarias de vedação (padrão em "X" ou "V"), o desnivelamento de pisos e a ruptura de revestimentos, além da torção em vigas e lajes, com fissuras de flexão assimétricas e o colapso parcial em casos extremos como ruptura de pilares, são exemplos de causas desta manifestação patológica.

Um exemplo notório de recalque diferencial, em que ocorre o deslocamento de maneira distinta entre os elementos, pode ser observado nos edifícios localizados na orla da cidade de Santos, no litoral de São Paulo. Essas construções, erguidas entre as décadas de 1940 e 1970, foram implantadas sobre solos compostos por camadas superficiais de areia compacta e, abaixo, por argilas muito moles e altamente compressíveis. A utilização de fundações rasas, como sapatas, sem a devida consideração das características geotécnicas do subsolo, resultou em recalques diferenciais significativos, levando à inclinação visível de diversos edifícios. Essa condição pode ser observada por transeuntes e é ilustrada na Figura 8.



Figura 8 - Prédios em desnível devido ao recalque (unicamp.br, 2021)

Os recalques diferenciais podem provocar fissuração nas ligações entre elementos estruturais, comprometendo a estanqueidade, a integridade das vedações e os acabamentos internos e externos. Em casos mais graves, podem levar à perda da estabilidade global da estrutura, exigindo intervenções corretivas complexas e custosas.

A continuidade do recalque pode causar deformações permanentes e reduzir a vida útil da construção.

O diagnóstico inicial envolve levantamentos topográficos para detectar variações no nível da estrutura. Inspeções visuais identificam fissuras características e desalinhamentos. Adicionalmente, monitoramentos instrumentais podem incluir nivelamentos periódicos, sensores de deslocamento e inclinômetros. As análises geotécnicas complementares ajudam a entender a origem e a extensão do problema (SOUZA & RIPPER, 1998).

Priorizando-se a prevenção deste problema, a fase de projeto de uma estrutura exige uma investigação geotécnica detalhada, a fim de se garantir a segurança e a estabilidade da construção. Essa investigação abrange a realização de sondagens SPT, que avaliam a resistência do solo, ensaios de permeabilidade para entender o comportamento da água no terreno, e análises de compressibilidade, que preveem como o solo se deformará sob carga.

Com base nesses dados, é possível realizar a seleção adequada do tipo de fundação. Por exemplo, sapatas são indicadas para solos mais resistentes, enquanto estacas ou radiers (lajes de fundação) são mais apropriados para solos compressíveis ou com menor capacidade de suporte. Além disso, no projeto, é fundamental prever juntas de construção para acomodar eventuais deformações diferenciais que possam ocorrer na estrutura.

Os recalques constituem uma das patologias mais complexas em estruturas de betão armado, exigindo abordagem que integre geotecnia, projeto estrutural e monitoramento pós-obra. A adoção de boas práticas normativas e a correta interpretação dos dados geotécnicos são essenciais para minimizar riscos.

II CAPÍTULO - MÉTODO GDE/UNB

A metodologia GDE/UnB (Grau de Deterioração da Estrutura) tem sua origem na adaptação de uma abordagem inicialmente desenvolvida por Klein et al. (1991), durante um convênio entre a Prefeitura de Porto Alegre e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Essa abordagem visava identificar problemas em Obras de Arte Especiais (OAE's), classificar as estruturas com base na gravidade dos danos e atribuir graus de risco. Com base nesse modelo, Castro (1994) desenvolveu a formulação da metodologia GDE/UnB para avaliação quantitativa de edificações em betão armado, propondo uma estrutura de cálculo baseada em fatores de intensidade e ponderação dos danos.

A metodologia foi aprimorada e validada em diversos estudos no Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília (PECC/UnB). Lopes (1998) aplicou-a em edificações comerciais do Banco do Brasil, Boldo (2002) expandiu seu uso para edificações do Exército Brasileiro, e Fonseca (2007) incorporou modificações relevantes na formulação, além de propor um roteiro sistematizado de inspeção para estruturas de betão armado. Posteriormente, Euqueres (2011) adaptou a metodologia para avaliação de pontes de betão armado em Goiás, mostrando sua versatilidade em diferentes tipologias estruturais.

A dissertação de mestrado de Verly (2015) reforçou esse histórico, demonstrando a aplicação da metodologia em 22 OAE's na região metropolitana de Brasília, em comparação com o método DNIT. O trabalho concluiu que o GDE/UnB oferece uma escala mais sensível para a priorização de intervenções, especialmente em situações em que múltiplas OAE's apresentam classificações semelhantes no sistema tradicional do DNIT. O APÊNDICE III mostra outros casos em que a metodologia foi aplicada.

Por fim, em 2023 foi lançado pela Editora UnB, o livro “Metodologia GDE - Uma Revolução na Estimativa de Danos em Estruturas de Betão”, de autoria dos professores João Carlos Teatini de Souza Clímaco e Antônio Alberto Nepomuceno, que também traz embasamento para este estudo.

II.1 Desenvolvimento do método

Com o objetivo de estruturar a aplicação da metodologia GDE/UnB (Grau de Deterioração da Estrutura) de forma lógica e replicável, apresenta-se a seguir o

fluxograma das etapas sequenciais do processo de avaliação. A metodologia parte da classificação de elementos em componentes da estrutura que será separado em famílias, permitindo agrupar elementos semelhantes.



Fluxograma das etapas da avaliação (adapt. de Teatini, 2023)

Em um segundo momento, realiza-se a quantificação dos danos observados por meio do cálculo do Grau de Dano (Gd) individual. Com esses dados, são determinados dois índices específicos: o Grau de Deterioração Estrutural (Gde), que avalia o comprometimento físico dos elementos estruturais, e o Grau de Deterioração Família desses elementos (Gdf), voltado aos aspectos de desempenho e funcionalidade do sistema construtivo.

A fase final consiste no cálculo do GDE, consolidando os resultados obtidos por família e gerando um indicador numérico que expressa, de forma sintética, o estado de conservação da edificação. As seções seguintes deste trabalho detalham cada uma dessas etapas, com base em fundamentos teóricos, equações empregadas e critérios de interpretação dos resultados.

II.1.1 Processo de Cálculo – Metodologia GDE

II.1.1.1 Grau do dano

O modelo de Tuutti (1982), originalmente se divide no processo de segregação em duas fases principais: a fase de iniciação, em que ainda não há danos visíveis, mas os mecanismos de deterioração já estão em curso; e a fase de propagação, onde os danos se manifestam e evoluem no interior da estrutura. A soma desses períodos define a vida útil da estrutura, ou seja, o tempo em que ela atende aos requisitos técnicos de desempenho.

No entanto, a aplicação prática desse modelo é limitada em estruturas existentes, pois frequentemente não se conhece a idade exata da edificação. Para contornar essa limitação, Castro (1994) propôs uma adaptação ao modelo de Tuutti, substituindo o tempo pelo fator de intensidade do dano (F_i) como variável principal. Assim, o grau de deterioração passa a ser avaliado a partir de critérios observáveis, o que facilita sua aplicação em inspeções de campo e avaliações de estruturas com dados históricos incompletos.

Logo o grau de dano (G_d) representa a gravidade de um dano específico em um elemento estrutural e é calculado com base em dois fatores, conforme Quadro 2:

Fator de Ponderação do Dano (F_p)	Reflete a importância relativa do dano para a segurança, funcionalidade e estética do elemento	Valores de 1 a 5
Fator de Intensidade do Dano (F_i)	Classifica a gravidade e evolução do dano	Valores de 0 a 4

Quadro 2 – Intervalo de Fatores de Ponderação e Intensidade (adapt. de Teatini, 2023)

O fator de ponderação (F_p) tem por desígnio quantificar a gravidade de um dano tendo como questões importantes à funcionalidade, condições gerais de estética e segurança dos elementos de uma família. Os fatores de ponderação podem variar de 1 a 5. A Tabela 2 mostra o grau do dano das lesões em função da gravidade e evolução de uma manifestação patológica presente no elemento estrutural analisado de acordo com o fator de intensidade (F_i), determinado em uma escala de 0 a 4. O ANEXO I traz uma tabela com F_i 's usuais, a fim de orientar o avaliador, e parametrizar, na medida do possível o resultado do cálculo. Os ANEXOS II e III fazem o mesmo apontamento para os F_p 's.

Graus das lesões	Fator de intensidade (F_i)
Elementos sem lesões	0
Elemento com lesões leves	1
Elemento com lesões toleráveis	2
Elemento com lesões graves	3
Elemento em estado crítico	4

Tabela 2 - Fatores de intensidade (F_i) em função dos elementos e o grau das lesões (adaptado de Teatini (2023))

Após a análise de cada elemento, fazendo a determinação do grau da lesão decorrente, utilizam-se as equações (1) e (2) para dar continuidade à obtenção do Grau de deterioração de um elemento (G_{de}), do Grau de deterioração de uma família de elementos (G_{df}) e finalmente para o Grau de deterioração da estrutura (G_d).

$$D = 0,8 F_i F_p \quad \text{para } F_i \leq 2,5 \quad (1)$$

$$D = (12 F_i - 28) F_p \quad \text{para } F_i > 2,5 \quad (2)$$

II.1.1.2 Grau de deterioração de um elemento

O Grau de Deterioração do Elemento (*Gde*), pode ser calculado após a determinação dos danos isolados. Ele avalia o estado de deterioração de um elemento estrutural, considerando todos os danos identificados conforme a equação (3) apresenta:

$$G_{de} = D_{máx} \left[1 + \frac{(\sum_{i=1}^n D_i) - D_{máx}}{\sum_{i=1}^n D_i} \right] \quad (3)$$

Onde:

- *Gde*: Grau de deterioração do elemento;
- *Di*: Grau do dano de índice "i";
- *Dmáx*: Maior grau do dano encontrado no elemento;
- *n*: Número de danos nos elementos;

A partir do valor de grau de deterioração dos elementos (*Gde*), pode-se determinar o grau de deterioração de cada elemento e as ações a serem seguidas como mostra a Tabela 3:

Nível de deterioração	Gde	Ações recomendadas
Baixo	0-15	Estado aceitável. Manutenção preventiva.
Médio	15-50	Definir prazo e natureza de nova inspeção. Planejar intervenção em longo prazo (máximos dois anos).
Alto	50-80	Definir prazo para inspeção especializada. Planejar intervenção em médio prazo (máximo um ano).
Sofrível	80-100	Definir prazo para inspeção especializada rigorosa. Planejar intervenção em curto prazo (máximos seis meses).
Crítico	>100	Inspeção especializada imediata e medidas emergenciais (alívio de carga, escoramento, etc.). Planejar intervenção imediata.

Tabela 3 – Classificação dos níveis de deterioração (Fonseca, 2007)

II.1.1.3 Grau de deterioração de uma família de elementos

O *Gdf* faz a análise o conjunto de elementos pertencentes a uma mesma família (grupos com características similares), por meio da equação (4) a seguir:

$$G_{df} = G_{de,m\acute{a}x} \left[1 + \frac{(\sum_{i=1}^m G_{de,i}) - G_{de,m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^m G_{de,i}} \right] \quad (4)$$

Onde:

- $G_{de,m\acute{a}x}$: Maior grau de deterioração encontrado na família;
- $G_{de,i}$: Graus de deterioração dos elementos da família (apenas valores ≥ 15);
- m : Número de elementos com $G_{de} \geq 15G$;

II.1.1 Classificação de Elementos

Segundo Verly (2015), a etapa de classificação dos elementos estruturais em famílias consiste na organização dos componentes da estrutura com base em suas características formais e na função que desempenham no sistema como um todo. Cada família reúne elementos tratados de maneira uniforme pela metodologia, embora essa categorização não seja rígida, exigindo reavaliação a cada nova aplicação. Isso se deve ao fato de que elementos com a mesma nomenclatura podem ter diferentes graus de relevância estrutural, dependendo da configuração do sistema em que estão inseridos. Fonseca (2007), ao empregar essa abordagem, agrupou os elementos conforme apresentado na Tabela 4, a seguir.

Elemento	Fr
Elementos de composição arquitetônica	1,0
Reservatório superior	2,0
Escadas/rampas, reservatório inferior, cortinas, lajes secundárias, juntas de dilatação	3,0
Lajes, fundações, vigas secundarias, pilares secundários	4,0
Vigas e pilares principais	5,0

Tabela 4 - Fatores de relevância estrutural (Fr) das diversas famílias de elementos (FONSECA, 2007 e VERLY, 2015)

II.1.1.1 Grau de deterioração da estrutura

O grau de deterioração da estrutura representa o estado geral de deterioração, ponderando a relevância de cada família de elementos. O cálculo será feito por meio da Fórmula (5):

$$G_d = \frac{\sum_{i=1}^k (F_{r,i} \cdot G_{df,i})}{\sum_{i=1}^k F_{r,i}} \quad (5)$$

Onde:

- *Fri*: Fator de relevância estrutural da família (valores de 1 a 5, conforme a importância);
- *Gdf,i*: Grau de deterioração da família "i";
- *k*: Número de famílias na estrutura;

Mediante ao valor encontrado pelo Grau de deterioração da estrutura (G_d) através dos cálculos é possível fazer a sugestão de uma intervenção para a estrutura. De acordo com a Tabela 5 a estrutura pode ser classificada em uma escala com a indicação do nível de deterioração e a recomendação de ações a serem tomadas. A sugestão de VERLY (2015) de planilha para inspeção está demonstrada no ANEXO III.

Nível de deterioração	Gd	Ações recomendadas
Baixo	0 - 15	Estado aceitável. Manutenção preventiva.
Médio	15 - 50	Definir prazo/natureza para nova inspeção. Planejar intervenção em longo prazo (máximo 2 anos).
Alto	50 - 80	Definir prazo/natureza para inspeção especializada detalhada. Planejar intervenção em médio prazo (máximo 1 ano).
Sofrível	80 - 100	Definir prazo/natureza para inspeção especializada detalhada. Planejar intervenção em curto prazo (máximo 6 meses).
Crítico	100	Inspeção especial emergencial. Planejar intervenção imediata

Tabela 5 - Classificação dos níveis de deterioração da estrutura pela metodologia GDE/UnB (FONSECA, 2007)

III CAPÍTULO - CASO PRÁTICO - CATEDRAL DE BRASÍLIA

I.1 Histórico da construção

A capital do Brasil, Brasília, situada no planalto central brasileiro, é o clímax do projeto desenvolvimentista do então presidente, Juscelino Kubistchek de Oliveira. Durante quatro anos, entre 1956 e 1960, o cenário inóspito da capital foi alterado de forma radical pela abertura de largas avenidas, quadras, pela construção de palácios e edifícios.

A cidade de Brasília é tombada em duas categorias, sendo elas, local e federal, e nomeada como patrimônio mundial pela Unesco. Assim, a cidade vem alavancando uma série de intervenções em seus monumentos a fim de eternizar às gerações futuras sua importância e significado, tendo a Catedral de Brasília como um dos exemplos das construções preservadas (PASCHOALIN, 2012).

A construção da Catedral Metropolitana de Brasília é um dos mais emblemáticos marcos da arquitetura moderna brasileira, sendo o primeiro monumento iniciado na nova capital do país. Projetada pelo arquiteto Oscar Niemeyer e com cálculo estrutural do engenheiro Joaquim Cardozo, a Catedral simboliza tanto a inovação tecnológica quanto a expressividade artística que marcaram a construção de Brasília.

Na figura 9 a seguir, pode-se ter uma visão geral do conjunto de edificações da Catedral de Brasília: nave principal, espelho d'água, batistério, em formato de ovoide e o campanário, localizado à esquerda.



Figura 9 – Catedral Metropolitana de Brasília (2022)

III.1.1 Concepção Arquitetônica e Localização

A localização da catedral foi determinada por Lúcio Costa, responsável pelo Plano Piloto da capital federal. O templo foi estrategicamente posicionado em uma praça autônoma, fora da Praça dos Três Poderes, como símbolo da separação entre Estado e religião e para preservar a escala monumental do Eixo Monumental. A ideia era garantir que a catedral tivesse visibilidade e protagonismo espacial, sem interferir no alinhamento dos edifícios governamentais.

A proposta de Niemeyer se inspirou nas grandes cúpulas das catedrais clássicas, mas adaptou essa referência à estética e às possibilidades do betão armado. Com isso, a catedral assume uma forma hiperboloide resultante da elevação de dezesseis pilares de betão armado, de seção parabólica, pesando cerca de 90 toneladas cada. Esses pilares, com disposição radial, convergem para o topo como se fossem mãos erguidas ao céu, formando uma abóbada de grande impacto visual e simbólico. As Figuras 10 e 11 exemplificam essa concepção.



Figura 10 – Croqui de Oscar Niemeyer.
(ArcoWeb, 2019)



Figura 11 – Vista dos pilares ainda na fase de construção

III.1.2 Etapas da Obra e Soluções Estruturais

A pedra fundamental foi lançada em 12 de setembro de 1958. A estrutura principal foi concluída em 21 de abril de 1960, data da inauguração de Brasília. No entanto, a catedral permaneceu inacabada até 1970, quando foi finalmente consagrada e aberta ao público com todas as suas instalações artísticas e estruturais finalizadas.

A fundação da catedral foi realizada com 16 tubulões a céu aberto, cada um com aproximadamente 70 cm de diâmetro e 28 metros de profundidade, com base alargada. Esses tubulões suportam diretamente os 16 pilares de betão em formato de bumerangue, unidos por uma cinta inferior de betão que absorve os esforços de tração e por uma laje superior (não estrutural) que serve apenas como vedação e acabamento, conforme pode ser visto nas Figuras 12 e 13 abaixo.



Figura 12 – Oscar Niemeyer acompanhando a obra in loco.

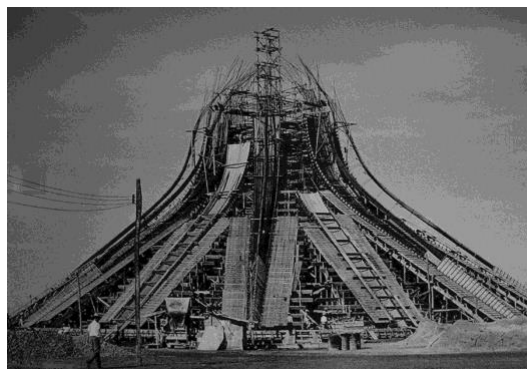


Figura 13 - Catedral de Brasília em construção (ARCHDAILY, 2012)

O engenheiro Joaquim Cardozo realizou cálculos avançados para a época, prevendo inclusive o efeito do vento sobre os vitrais curvos e os esforços nos pilares. Um diferencial do projeto foi a ausência de uma cinta visível no topo da estrutura: a compressão é absorvida por uma cinta interna, com cerca de 6,8 metros de diâmetro, invisível ao observador externo.

Segundo MAGALHÃES (2001), responsável técnico da construção da Catedral, não foram encontrados registros de cálculo estrutural do engenheiro responsável Joaquim Cardoso. Esse depoimento destaca que o modelo estrutural de Cardozo incluía, além do cálculo para suportar as cargas permanentes e sobrecargas, uma análise do efeito das cargas de vento nos vitrais, interagindo com os pilares, verificação um tanto sofisticada para a época.

A concretagem dos pilares exigiu soluções inovadoras, incluindo o uso de formas complexas desenhadas em escala real no canteiro de obras e a aplicação de técnicas de escoramento tipo “caixão perdido”. Cada etapa da concretagem era cuidadosamente controlada para garantir homogeneidade e resistência do betão. As Figuras 14 e 15 ilustram essas questões.

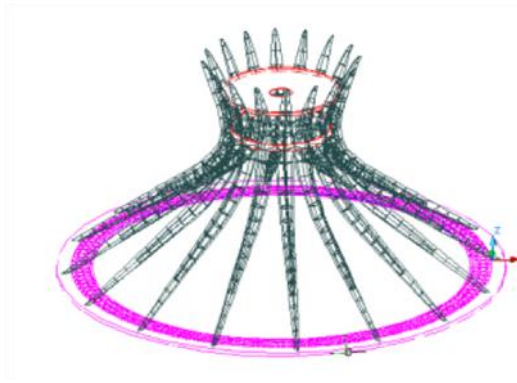


Figura 14 - Estrutura da Catedral de Brasília.
Programa AutoCAD (PESSOA, 2002)

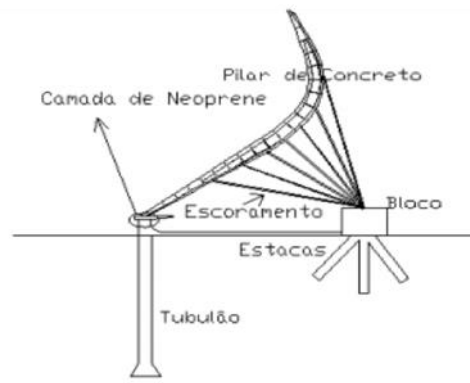


Figura 15 - Estrutura de escoramento dos pilares (MAGALHÃES, 2001)

III.1.3 Fase de Finalização e Elementos Artísticos

A catedral ficou parcialmente pronta por anos, sendo consagrada em 12 de outubro de 1968, mesmo sem a cobertura. A inauguração oficial ocorreu apenas em 31 de maio de 1970. A partir de então, foram concluídos os fechamentos em vidro, as escavações internas, os acessos subterrâneos e o paisagismo.

A cobertura da nave é formada por vitrais desenhados por Marianne Peretti, instalados entre os pilares. São 16 peças em fibra de vidro, com coloração em azul, verde, branco e marrom, medindo 10 metros de base por 30 metros de altura cada que podem ser vistos nas Figuras 16 e 17. Esses vitrais reforçam a luminosidade interna e o efeito de transcendência, permitindo a entrada de luz natural filtrada.

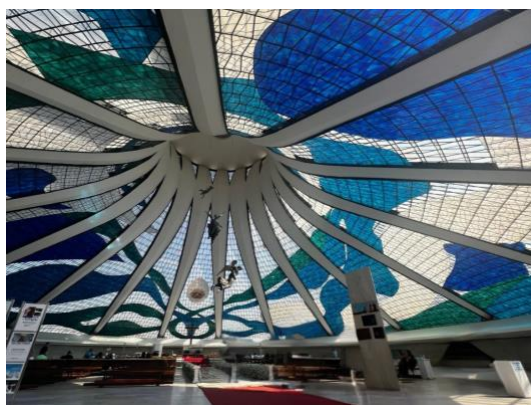


Figura 16 – Vitrais (Autoria própria, 2025)

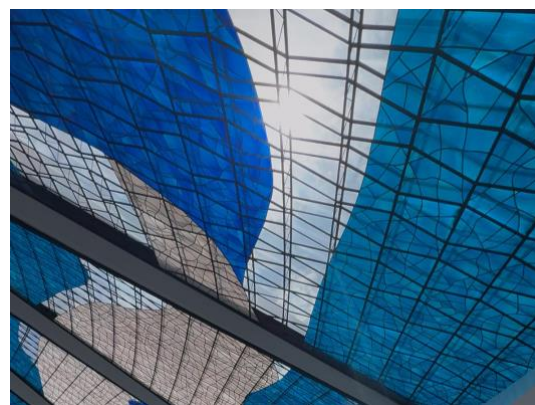


Figura 17 – Vitrais (Autoria própria, 2025)

O altar foi doado pelo papa Paulo VI. Uma réplica da imagem de Nossa Senhora Aparecida, padroeira do Brasil, foi colocada no interior da nave. O batistério, em forma

ovoide, possui um painel de azulejos pintados por Athos Bulcão em 1977, com motivos religiosos. O campanário é composto por quatro sinos, doados pela Espanha.

Na área externa, quatro esculturas de bronze, com três metros de altura, representam os evangelistas e foram esculpidas por Alfredo Ceschiatti com colaboração de Dante Croce. Já no interior, suspensas por cabos de aço, há três esculturas de anjos com comprimentos variando entre 2,22 m e 4,25 m e pesos de 100 a 300 kg. A Via Sacra é uma obra de Di Cavalcanti, e um pilar com cenas da vida de Maria, pintadas por Athos Bulcão, emoldura a entrada.

III.1.4 Considerações Técnicas e Reconhecimento

O projeto da Catedral é um marco de engenharia estrutural e arquitetônica. A escolha do betão armado permitiu liberdade formal a Oscar Niemeyer e resistência à estrutura. O hiperboloide de base circular com colunas em formato parabólico exige compreensão precisa da distribuição de esforços, algo que Cardozo soube calcular com maestria.

A obra foi reconhecida internacionalmente. Foi, inclusive, uma das principais razões pelas quais Niemeyer recebeu o Prêmio Pritzker de Arquitetura em 1988, o equivalente ao Prêmio Nobel da área. A catedral, apesar de ter sido tombada como patrimônio histórico e artístico nacional ainda nos anos 90, continua a ser um dos símbolos mais reconhecíveis de Brasília, além de ser a sede da Arquidiocese da capital, motivos pelos quais foi escolhida como tema de estudo.

IV ANÁLISE E RESULTADOS

Para a análise das manifestações patológicas na Catedral Metropolitana de Brasília, foram realizadas inspeções técnicas *in loco*. O objetivo principal foi verificar a presença e o desenvolvimento de patologias segundo os critérios estabelecidos pela metodologia GDE/UnB (2023). Durante as inspeções, foram registrados, por meio de fotografias, diversos elementos construtivos, incluindo pilares, vigas, lajes, revestimentos e juntas de dilatação. A observação detalhada desses componentes visou identificar os principais mecanismos de deterioração presentes na edificação. Todas as visitas técnicas foram previamente autorizadas e acompanhadas por profissional habilitado, assegurando o cumprimento das normas de segurança e dos princípios éticos da atividade técnica.

IV.1 Análise das manifestações patológicas

IV.1.1 Família de Pilares

Segundo a NBR 6118:2023, pilares são elementos estruturais verticais, predominantemente submetidos à compressão, cuja função principal é transmitir as cargas das vigas e lajes para os elementos de fundação. No contexto desta pesquisa, a compreensão do papel dos pilares foi essencial, uma vez que sua integridade estrutural está diretamente associada à estabilidade global da edificação, sobretudo em estruturas icônicas como a Catedral de Brasília, onde os pilares curvos assumem também uma função arquitetônica expressiva.

Os pilares da Catedral de Brasília, enquanto elementos estruturais fundamentais dessa obra emblemática do modernismo brasileiro, apresentam manifestações patológicas que refletem tanto o envelhecimento natural dos materiais quanto as condições ambientais às quais foram submetidos ao longo das décadas. Observa-se a desagregação do betão em algumas regiões, especialmente próximo às bases dos pilares, onde a umidade e os esforços mecânicos concentrados aceleram o processo de deterioração, expondo a armadura interna e comprometendo a integridade estrutural além disso, as manchas de corrosão, com tonalidades que variam do alaranjado ao avermelhado, indicam possível oxidação das barras de aço, fenômeno agravado pela carbonatação do betão ou pela infiltração de agentes agressivos, como cloretos, que reduzem a proteção oferecida pelo cobrimento.

Conforme evidenciado nas imagens em análise, os pilares da Catedral de Brasília exibem manifestações patológicas típicas de estruturas de betão armado submetidas a décadas de intempéries e solicitações mecânicas observa-se, a desagregação do betão. Apesar de haver sinais de uma recente intervenção, os pilares apresentam fissuração, quadro agravado pela ação da humidade à qual estão expostos, visto que as extremidades inferiores dos pilares ficam imersas no espelho d'água, denunciando a degradação progressivamente da estrutura.

A análise dessas patologias revela alto índice de fissuras conforme apresentado nas Figuras exemplificativas a seguir, provocando o destacamento, possivelmente decorrentes de práticas construtivas da época conforme mencionado. O APÊNDICE I apresenta demais imagens e seus respectivos croquis de avaliação.



Figura 18 – Pilares 7 e 13 do Apêndice I - Fissuras, umidade ascendente (Autoria própria)

Devem ser excluídos do cálculo do Grau de Deterioração da família, todos os pilares, com exceção dos pilares 01, 07 e 16, por terem obtido valor de $G_{de} < 15$. Os resultados dos demais pilares serão utilizados para cálculo do G_{de} da família dos pilares e os resultados serão dispostos no item IV.3. O APÊNDICE II mostra os cálculos de forma pormenorizada.

Família de Pilares (Gde e Gdf)	
Pilar 01	23,11
Pilares 2, 3, 4, 5, 6, 8, 11, 12, 13 e 15	11,56
Pilares 07 e 16	32,35
Pilares 09 e 14	12,92
Pilar 10	12,67
G_{df} - Família de Pilares	52,78

Tabela 6 – Gde e Gdf da família de pilares (Autoria própria, 2025)

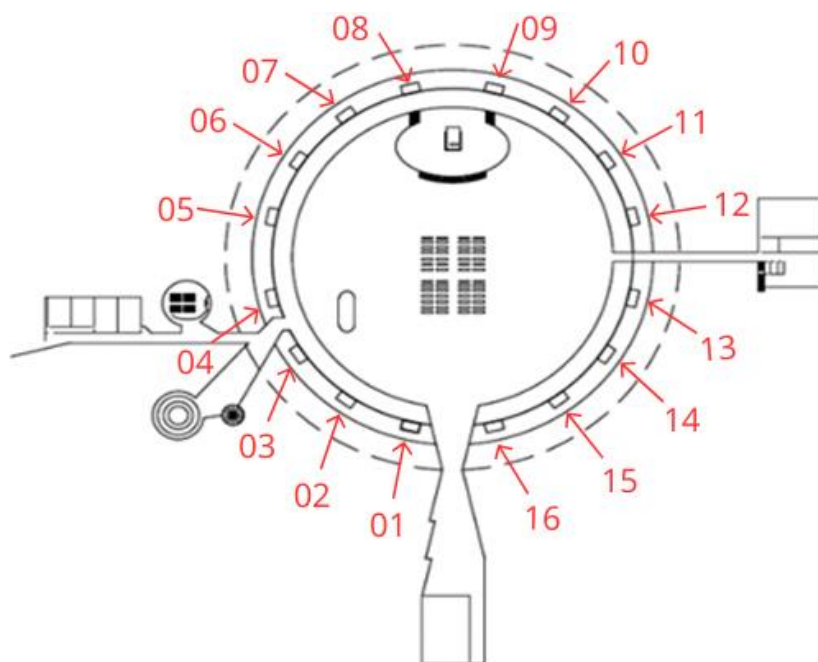


Figura 19 – Localização dos Pilares (Autoria própria, 2025)

IV.1.2 Família de Lajes

As lajes são elementos planos, geralmente horizontais, que compõem pisos e coberturas, com função primária de distribuir as cargas verticais para vigas e pilares. A ABNT NBR 6118:2023 classifica as lajes segundo sua tipologia (maciças, nervuradas, protendidas, entre outras). Conforme expõe Fusco (2007), esses elementos também possuem papel importante na rigidez e no comportamento dinâmico da estrutura. Na Catedral de Brasília, a inspeção das lajes, possibilitou identificar manifestações patológicas relacionadas à infiltração e ao envelhecimento dos materiais de impermeabilização.

Nas imagens exemplificativas, são evidentes manchas de umidade, eflorescência e desagregação superficial do betão, provavelmente causadas por infiltrações prolongadas. As áreas apresentam perda de revestimento e indícios de trincas internas, causadas pela entrada constante de água através da laje superior. Essas patologias são típicas de sistemas de cobertura com impermeabilização ausente ou falha, agravadas por variações térmicas e baixa ventilação.



Figura 20 – Manchas, fissuras, armadura exposta e corrosão na laje da sala de máquinas – Laje 01 do APÊNDICE I (autoria própria, 2025)

As próximas imagens mostram manchas escorridas de água e fungos no forro, logo abaixo de uma claraboia. Isso indica infiltração intensa no ponto de contato entre o vidro e a estrutura de betão, falha comum em sistemas de vedação de coberturas translúcidas. Há presença de mofo e bolor, o que aponta um ambiente interno com alta umidade, podendo afetar a saúde dos usuários e a conservação de elementos internos.

Observa-se também deslocamento acentuado do betão, com armadura totalmente exposta e sinais claros de corrosão avançada. A tubulação aparente sugere interferências e adaptações improvisadas que podem ter contribuído para o comprometimento da seção da laje. A exposição contínua às intempéries, associada à má execução de detalhes construtivos, como juntas e passagens de tubulações, agrava o processo de deterioração.



Figura 21 – Lajes 03 e 04 do APÊNDICE I - Manchas, infiltração, desagregação e fissuras (Autoria própria, 2025)

O Grau de deterioração da análise das lajes pode ser considerado alto. Há lajes que apresentam armadura exposta já em processo de corrosão devido ao cobrimento deficiente, fissuras que circundam sua totalidade e manchas de infiltração, gerando um G_{de} alto. Sendo assim, é sugerida nova inspeção planejando intervenção em médio prazo (máx. um ano).

A Laje do espelho d'água foi analisada em duas partes, sendo elas interna e externa. Na parte externa notou-se a elevada presença de fissuras, fazendo com que a água infiltre pelas aberturas, classificado com o nível crítico demandando o planejamento de intervenção imediata. Demais imagens e croquis de avaliação no APÊNDICE I.

Família das Lajes	
Lajes 01	17,55
Laje 02	32
Laje 03	73,61
Laje 04	34,15
Gdf – Família de Lajes	112,78

Tabela 7 – GDE da família das Lajes (Autoria própria, 2025)

IV.1.3 Família de Revestimentos

O revestimento desempenha uma função mista entre proteção e acabamento. De acordo com a NBR 7200:1998, os revestimentos argamassados visam proteger superfícies contra a ação de agentes físicos e químicos, melhorar o desempenho térmico e acústico, e proporcionar acabamento estético. Em edificações de betão em parte aparente, como a Catedral, a ausência de revestimentos tradicionais torna ainda mais relevante a manutenção da integridade da camada superficial do betão estrutural, que deve resistir diretamente aos agentes de deterioração ambiental.

Quanto aos revestimentos, as manifestações observadas indicam falhas severas de estanqueidade. A presença de manchas escuras de bolor e fungos nas paredes internas revela umidade ascendente ou infiltração proveniente de falhas na impermeabilização ou defeito em juntas. Nas figuras exemplificativas, é possível observar fissura no revestimento, o que compromete não apenas a estética, mas também a função de proteção do substrato. Este tipo de fissura pode ser decorrente de retração térmica, movimentações estruturais ou recalques diferenciais.

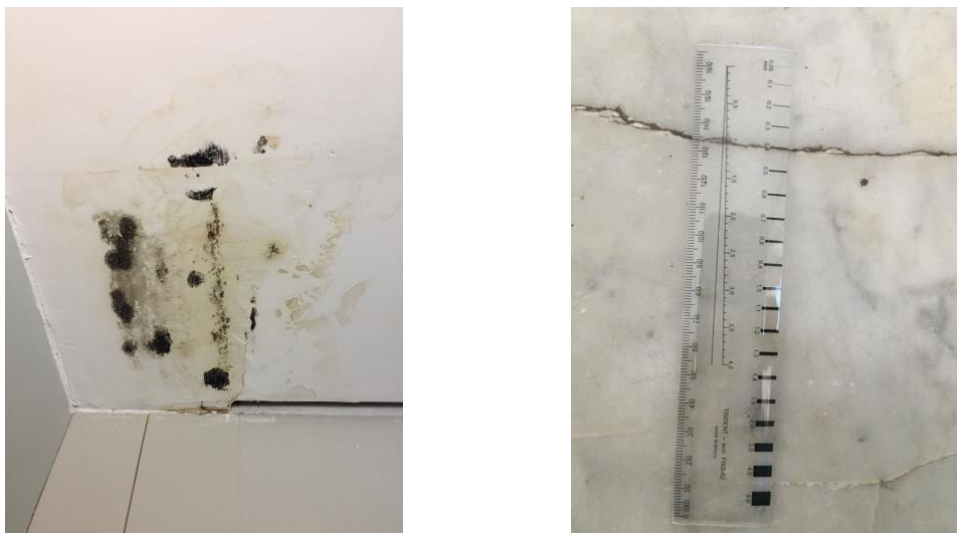


Figura 22 – Revestimentos 01 e 03 do APÊNDICE I - Manchas, fissuras, umidade (Autoria própria, 2025)

Com base na inspeção local, foram calculados os Graus de deterioração de cada elemento registrado de forma fotográfica e indicado o seu respectivo local. O G_{de} do revestimento que apresenta valor < 15 não é considerado nos cálculos posteriores, conforme orientação do método, sendo apenas necessária manutenção preventiva.

A análise do piso detectou fissuras tanto na entrada principal como ao redor do altar. O valor do G_{de} dos revestimentos foi de 48. Portanto o nível de deterioração média variando de 15-50, determinando um prazo e natureza de nova inspeção planejando intervenção em longo prazo (máx. 2 anos). Demais imagens e croquis de avaliação no APÊNDICE I.

Família de Revestimentos	
Gde Revestimento 01	32
Gde Revestimento 02	32
G_{df} - Revestimentos	48

Tabela 8 – GDE família de Revestimentos (Autoria própria, 2025)

IV.1.4 Família de Juntas de Dilatação

As juntas de dilatação são dispositivos construtivos projetados para absorver variações dimensionais da estrutura, decorrentes de ações térmicas, retrações ou recalques diferenciais. Segundo a EN 1992-1-1 (Eurocódigo 2) e abordado por Mehta & Monteiro (2014), a função dessas juntas é evitar o surgimento de fissuras indesejadas e sobrecargas internas em decorrência da restrição aos movimentos naturais da estrutura. Na Catedral,

a análise das juntas revelou sua importância na preservação da integridade dos grandes elementos curvos, além de possibilitar o diagnóstico de falhas de manutenção associadas a infiltração

As figuras exemplificativas a seguir apresentam manifestação de fissuração longitudinal ao longo da laje do espelho d'água, acompanhando precisamente o traçado de uma junta estrutural não adequadamente tratada. A abertura excessiva da junta, perceptível pela dimensão da trinca e sua continuidade, sugere que o selante foi inexistente ou ineficaz frente às movimentações da estrutura. Tal situação propicia a propagação de tensões pelo elemento, culminando em destacamentos e perda de desempenho estético e funcional.

Na segunda figura, observa-se a ocorrência de infiltração acentuada ao longo da junta de dilatação vertical do forro, com escorrimento de água e presença de manchas escurecidas, indicativos da falha de vedação do material elástico originalmente aplicado e de manutenção periódica. Essa falha permitiu a percolação de umidade, gerando possíveis focos de eflorescência e contribuindo para o desenvolvimento de fungos na região inferior da laje, o que compromete não apenas a durabilidade do sistema de vedação, mas também as condições de salubridade do ambiente.



**Figura 23 – Juntas de dilatação externa do Espelho d'água e interna, do corredor para o batistério
Piso fissurado, pintura manchada, falha de selante da junta (Autoria própria, 2025)**

Portanto, evidencia-se a importância de uma abordagem criteriosa no dimensionamento, execução e manutenção das juntas de dilatação, garantindo a utilização de materiais compatíveis com as movimentações esperadas e o correto detalhamento construtivo. A negligência desses aspectos pode desencadear patologias com repercussões significativas tanto na funcionalidade quanto na segurança da edificação. As juntas de dilatação tiveram o grau de dano menor que 15, portanto são desconsideradas nos cálculos.

IV.1.1 Família de escadas e rampas

As figuras exemplificativas abaixo mostram que as patologias não se limitam à superfície destes elementos, mas refletem problemas intrínsecos à concepção original da estrutura. Pode-se observar, por exemplo, além da desagregação, falhas de revestimento. As manchas de corrosão seguem padrões que indicam sua insuficiência, pois o projeto original previa apenas 1,5 cm conforme a NB 1/1960, (norma ultrapassada frente aos 3 cm exigidos atualmente pela NBR 6118/2023 para o caso).



Figura 24 – Deslocamento, eflorescência, possível corrosão (autoria própria, 2025).

A família de escadas e rampas apresentou um valor considerado alto para o GDE, principalmente devido a exposição da armadura.

Família de Escadas e Rampas	
G_{de}	55,61
G_{df}	55,61

Tabela 9 – GDE família de escadas e rampas (Autoria própria)

IV.2 Aplicação do método GDE/UnB (2015)

Para esta edificação, foram identificadas as seguintes famílias representativas: pilares, escadas e rampas, lajes, revestimentos e juntas de dilatação. Cada elemento foi inspecionado *in loco*, com registros fotográficos e atribuições de fatores conforme a presença, intensidade e extensão de manifestações patológicas identificadas, como fissuras, deslocamentos, eflorescências, corrosão de armaduras, falhas de revestimento e obstruções em juntas.

O processo avaliativo utilizou as tabelas de apoio do manual da metodologia GDE/UnB (2023) para determinação dos fatores de ponderação (F_p) e intensidade (F_i), os quais são

fundamentais para mensurar o grau de dano observado em função de critérios de funcionalidade, segurança estrutural e impacto estético.

Todo o processo já escrutinado foi replicado para todas as famílias, permitindo a consolidação dos dados e cálculo do Grau de Deterioração da Família (Gdf), etapa que possibilita a hierarquização das intervenções conforme o nível de comprometimento estrutural e funcional identificado. Importa destacar que elementos que obtiveram valor do grau do dano menor que são desconsiderados dos cálculos posteriores, sob o risco de mascararem a real deterioração pela qual a estrutura passa.

IV.3 Resultados

IV.3.1 Cálculo do Grau de Deterioração da Estrutura

Considerando os resultados de grau de deterioração das famílias de elementos, importa destacar a importância de cada uma. Vale ressaltar que a partir destas ponderações e da observação dos valores indicados para o fator de ponderação na Tabela 4 (pág. 43) será calculado o valor final da deterioração da estrutura.

Não é demais recordar que a família dos pilares constitui um dos principais elementos estruturais da Catedral de Brasília, sendo responsável pela sustentação vertical da cobertura e pela transferência de cargas ao solo. Durante as inspeções, foram observadas manifestações patológicas significativas, como fissuração com armadura exposta, deslocamento de cobrimento e sinais de corrosão ativa, indicando comprometimento tanto estético quanto funcional.

As lajes, especialmente as de cobertura, desempenham papel essencial tanto estrutural quanto arquitetônico na composição do templo. As manifestações patológicas registradas incluem presença de eflorescências, bolor, fissuração superficial e, em alguns casos, sinais de lixiviação, indicativos de infiltração contínua. Tais danos impactam negativamente a durabilidade e a estética do betão.

Já os revestimentos externos e internos da catedral representam não apenas proteção à estrutura, mas também um dos principais aspectos do valor arquitetônico e simbólico da edificação. As manifestações observadas, como falhas de aderência, destacamentos, trincas de origem térmica e manchas superficiais, indicam deterioração em andamento, muitas vezes potencializada pela exposição contínua à umidade.

E por fim, as juntas de dilatação, elementos essenciais ao comportamento térmico da edificação, foram encontradas, em sua maioria, obstruídas ou com vedação comprometida. Esse cenário favorece o acúmulo de umidade, infiltrações e manifestações secundárias como fissuras próximas, além de impactar diretamente o desempenho estrutural em termos de movimentações naturais.

Diante disso, a Tabela 10 aponta os valores considerados para o fator de relevância estrutural de cada família e seu produto pelo Gdf da respectiva família:

Família	Gdf	Fr	Gdf * Fr
Pilares	52,78	5	263,9
Lajes	112,8	4	451,2
Revestimento	48	1	48
Escadas e Rampas	55,61	3	166,83
Total			929,93

Tabela 10 – Deterioração das famílias de elementos vs. Fator de ponderação

Por fim, aplicando-se a equação de cálculo (equação (5), pág. 54) da deterioração total da estrutura, obtém-se o valor final. $GDE = 929,93/13$:

$$GDE = 72$$

Nível de deterioração	Gd	Ações recomendadas
Alto	50 - 80	Definir prazo/natureza para inspeção especializada detalhada. Planejar intervenção em médio prazo (máximo 1 ano).

O valor final, de $GDE = 72$, aponta para um nível de danos alto, que demanda inspeção extensiva e planejamento de intervenção em médio prazo (máximo um ano).

CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo analisar as manifestações patológicas em estruturas de betão armado, com base na metodologia GDE/UnB (2015/2023), buscando identificar as causas, os agentes desencadeadores e os efeitos dessas patologias sobre o desempenho estrutural e a durabilidade da edificação analisada. A aplicação da metodologia demonstrou-se eficaz para o diagnóstico técnico e sistemático das condições da estrutura, oferecendo subsídios claros para a tomada de decisões quanto à manutenção e intervenções necessárias.

Ao longo do estudo, foi possível observar uma variedade de patologias, muitas das quais associadas à ausência de manutenção preventiva e corretiva ao longo dos anos. Entre as manifestações mais recorrentes destacam-se a contaminação por cloretos, o deslocamento do betão, armadura expostas e fissuras. Esses problemas, em sua maioria, decorrem de agentes físicos e químicos ambientais, da qualidade do material e da execução da obra, além da deficiência ou inexistência de sistemas de impermeabilização adequados.

A análise permitiu constatar que elementos estruturais críticos como pilares, juntas de dilatação, escadas, rampas e lajes apresentaram níveis variados de deterioração, sendo que, mesmo quando os valores numéricos do grau de deterioração não indicam colapso iminente, há evidente perda de desempenho estrutural e funcional. Esse fato reforça a importância de uma cultura de manutenção permanente, planejada e tecnicamente orientada para edificações com significativa carga histórica, simbólica ou funcional.

Adicionalmente, observou-se que os efeitos da deterioração, mesmo que inicialmente localizados ou superficiais, tendem a se agravar com o tempo, podendo comprometer a segurança dos usuários e a integridade do sistema estrutural como um todo. A metodologia utilizada forneceu parâmetros objetivos para a classificação dos danos, permitindo estabelecer prioridades de intervenção e prazos recomendados para inspeções especializadas e correções.

Do ponto de vista técnico-científico, o trabalho contribuiu para reforçar a relevância de metodologias sistematizadas de diagnóstico e para a valorização do monitoramento contínuo da saúde estrutural das edificações. A preservação da vida útil e do desempenho das construções deve ser encarada como uma diretriz estratégica em qualquer programa de gestão patrimonial e engenharia diagnóstica.

Dentre as intervenções consideradas adequadas, considerando-se as patologias encontradas, estão o ensaio de carbonatação, observando-se os limites do pH ideais (entre 8,2 e 9,8, e o respectivo reparo das peças carbonatadas, além da recomposição das áreas de betão já deslocadas, visto que o cobrimento exigido pela NB-1 (1940) era consideravelmente menor que os atuais, e que a estrutura da Catedral já sofre os efeitos do cobrimento insuficiente, dando preferência a materiais que possuem alta durabilidade, impermeabilidade, além de boa aderência ao betão antigo e à armadura original. Além disso, a remoção das eflorescências e impermeabilização dos locais que a comportem a fim de evitar novos focos, também é recomendável.

Adicionalmente, é de extrema importância que as fissuras sejam reparadas, principalmente nas bases dos pilares de sustentação, e sendo possível, a realização de ensaios nos quais se possa verificar a profundidade dessas fissuras, a fim de se avaliar a segurança da estrutura. Contudo, a injeção de resinas epóxi poderá trazer um resultado razoável à médio prazo, visto que protegerá os elementos de outros ataques.

As infiltrações devem ser estancadas e novas impermeabilizações mais eficientes adicionadas, a fim de se evitar maiores danos e prejuízos. Assim como as juntas devem ser desobstruídas de forma a permitir o trabalho correto da estrutura. E, por fim, a limpeza das armaduras com corrosão e, caso a redução de seção tenha sido maior que 20%, a recomendação é de reforço estrutural, conforme a Norma DNIT 084/2006 – Tratamento de corrosão – Especificação de serviços.

Para finalizar, importa dizer que a Catedral de Brasília já tem projeto de reforma, restauração, bem como de criação de um espaço de encontro e reflexões, com custo estimado em R\$ 50 mi de reais, cerca de 7,7 mi de Euros, e previsão de entrega para 2030. Somente a primeira fase tem custo estimado de R\$ 10 mi de reais, que serão utilizados para a impermeabilização do espelho d'água e outros reparos mais urgentes.

A Catedral é um dos principais pontos turísticos da capital brasileira, e, portanto, deve ser alvo de manutenções periódicas, a fim de se prolongar sua vida útil e garantir que as futuras gerações conheçam este projeto tão diferenciado, que leva o nome do Brasil e seus profissionais a ser conhecido entre as demais nações.

BIBLIOGRAFIA

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12655:2022. Betão de cimento Portland — Preparo, controle e recebimento — Procedimento.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14.531, 2011. Inspeção predial – Procedimento.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575, 2021. Edificações habitacionais — Desempenho.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16097, 2012. Sistemas de impermeabilização com cristalização
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16747, 2020. Inspeção de Estruturas
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118, 2023. Projeto De Estruturas De Betão - Procedimento.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6122, 2010. Projeto E Execução De Fundação.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7200, 1998. Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7680, 2015. Betão — Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de betão
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9452, 2019. Inspeção de pontes viadutos e passarelas: procedimento.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9575, 2010. Impermeabilização - Seleção E Projeto.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9779, 2012. Argamassa e betão endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.
- ACI 318-19 — norma do American Concrete Institute que trata dos requisitos para estruturas de betão. ACI COMMITTEE 504. Guide to Sealing Joints in Concrete Structures. ACI 504R-90, American Concrete Institute, 1990.
- AECWEB. Vazios de concretagem põem em risco desempenho de estruturas de betão armado. Disponível em: . Acesso em: 5 jun. 2025.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 224.1R-07: Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures. Farmington Hills, MI, 2007.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 305R-10: Guide to Hot Weather Concreting. Farmington Hills, MI, 2010.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 309R-24: Guide for Consolidation of Concrete. Farmington Hills, MI, 2024.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 364R-14: Guide for Evaluation of Concrete Structures Prior to Rehabilitation. Farmington Hills, MI, 2014.
- ANDRADE, N.; D’ANDREA, R. Durabilidade de estruturas de betão: considerações para projeto e controle tecnológico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO BETÃO – CBC, 52., 2010
- ARCHDAILY BRASIL. Clássicos da Arquitetura: Catedral de Brasília / Oscar Niemeyer. São Paulo, publicado em 22 jun. 2013. Disponível em: . Acesso em: 8 jun. 2025.

- ASTM INTERNATIONAL. ASTM C597 – Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. West Conshohocken, PA, USA, 2016.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM C805-08(2017): Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete. West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D4788 – Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography. West Conshohocken, PA, 2020.
- BAZAGA, G. A., VITOR, M. F. & ALVES, R. R., 2018. Manifestações Patológicas No Edifício Sede Do Centro Universitário Do Distrito Federal - UDF. Brasília (DF): UDF.
- BAZANT, Z. P.; BAWEJA, S. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures. *Materials and Structures*, v. 53, n. 1, 2020.
- BENTUR, A.; DIAMOND, S.; BERKE, N. S. Steel corrosion in concrete: fundamentals and civil engineering practice. London: E & FN Spon, 1997.
- BERBERIAN, D., 2016. Engenharia De Fundações: Passo A Passo. 3ª Edição ed. Brasília(DF): DPP - Infrasolo/Fundex.
- BERTOLINI, L., 2010. Materiais De Construção: patologia | reabilitação | prevenção. São Paulo(SP): Oficina de Textos.
- BEZELGA, A. A. Edifícios de Habitação: Caracterização e Estimação Técnico-Económica. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 1984.
- BEZERRA, J. D. O., 2011. Automatização Do Método Gde/Unb Utilizando O Software Excel: Utilização Do Programa Para Avaliação De Um Edifício Ainda Em Construção. Belém(PA): UNAMA.
- BISCHOFF, P. H. Reevaluation of deflection prediction for concrete beams reinforced with steel and fiber reinforced polymer bars. *Journal of Structural Engineering*, v. 147, n. 1, 2021.
- BOLDO, P., 2002. Avaliação Quantitativa De Estruturas De Betão Armado De Edificações No Âmbito Do Exército Brasileiro. Brasília(DF): UnB.
- CAMARGOS, A. C., CARVALHO, H. & COUTO, J., 2018. Análise Das Manifestações Patológicas Causadas Por Intempéries Nas Fachadas Dos Edifícios Utiizando A Metodologia GDE/UnB (2015). Brasília(DF): UDF.
- CASTRO, E. K. d., 1994. Desenvolvimento De Metodologia Para Manutenção De Estruturas De Betão Armado. Brasília(Distrito Federal): Universidade de Brasília - UnB.
- CBCS – CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. Dados sobre corrosão e durabilidade em estruturas de betão. São Paulo, 2023
- CNUDDÉ, V. et al. Recent progress in X-ray CT as a geosciences tool. *Applied Geochemistry*, v. 23, n. 10, p. 2721-2736, 2020.
- DERLUYN, H. et al. Salt crystallization in hydrophobic porous materials. *Environmental Earth Sciences*, v. 78, n. 7, p. 1-15, 2019.
- Dnit - Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, 2004. Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias. Rio de Janeiro (RJ): MT - DNER - Instituto de Pesquisas Rodoviárias.
- D'AMICO, F.; BIANCHINI CIAMPOLI, L.; DI BENEDETTO, A.; BERTOLINI, L.; NAPOLITANO, A. Integrating nondestructive surveys into a preliminary BIM-oriented digital model for possible future application in road pavements management. *Infrastructures*, vol. 7, n. 1, p. 10, 2022.
- EN 206 (2013) — norma europeia que especifica os requisitos para betão.

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Relatório Técnico: Reabilitação de Estruturas Portuárias – Caso Porto de Santos. São Paulo: EPUSP, 2022.

EUQUERES, P., 2011. Metodologia De Inspeção Em Estruturas De Pontes De Betão Armado. Goiânia(GO): UFG.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 12504-3: Testing concrete in structures – Part 3: Determination of pull-out force. Brussels, 2005.

FARIA, R., ALVES, J., CASTRO, P. Patologia das Estruturas de Betão Armado. 2ª ed., LTC, 2008.

FERREIRA, B. M., 2016. Análise Quantitativa Da Ponte Do Bragueto - DF Utilizando A Metodologia GDE/UnB. Brasília(DF): UniCeub.

FOLHA DE S.PAULO. Prédio com estrutura comprometida é demolido em Santos. São Paulo, 22 ago. 2018. Disponível em: . Acesso em: 4 jun. 2025.

FONSECA, R. P. D., 2007. A Estrutura Do Instituto Central De Ciências: Aspectos Históricos, Científicos E Tecnológicos De Projeto, Execução, Intervenções E Proposta De Manutenção. Brasília(DF): UnB.

GARDNER, N. J.; LOCKMAN, M. J. Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete. ACI Materials Journal, v. 98, n. 2, 2020.

GHALI, A. et al. Concrete structures: stresses and deformations. 5th ed. Boca Raton: CRC Press, 2022.

GHOSH, S. Handbook of Structural Engineering. CRC Press, 2010.

GILBERT, R. I.; RANZI, G. Time-dependent behavior of concrete structures. London: Spon Press, 2021.

HELENE, P., ANDRADE, T. Durabilidade do Betão. Pini, 1993.

HELENE, P., PEREIRA, E. P. Betão: Ensino, Pesquisa e Realizações. PINI, 2011.

IBAPE. Manual de Avaliações e Perícias. São Paulo, 2023.

IBTON. Custo de reparos em estruturas. Relatório técnico, 2018.

INSTITUTO DA HABITAÇÃO E DA REABILITAÇÃO URBANA (IHRU). Portaria n.º 229/2018. Diário da República, 1.ª série, n.º 123, 28 jun. 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 15686-8:2020: Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 8: Reference service life and service life estimation. Geneva: ISO, 2020.

KLEIN, D. L.; GASTAL, F. P. S. L.; CAMPAGNOLO, J. L. Critérios adotados na vistoria e avaliação de obras de arte. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 25., 1991, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: UFRGS, 1991.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. LNEC E 392: Betões. Determinação da resistência à carbonatação. Lisboa: LNEC, 1993

LOPES, A. N. et al. Corrosion initiation in coastal structures: A 10-year monitoring study. Construction and Building Materials, v. 320, 2022.

LOPES, B. A. R., 1998. Sistema De Manutenção Predial Para Grandes Estoques De Edifícios: Estudo Para Inclusão Do Componente "Estrutura De Betão". Brasília(DF): UnB.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. CRC Press, 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th ed., McGraw-Hill, 2014.

MELCHERS, R. E. Structural Reliability Analysis and Prediction. 3rd ed. Wiley, 2019.

- MELO, J. F. D., SANTOS, L. B. C. S. & ALVES, M. A., 2018. Estudo Das Manifestações Patológicas Da Estrutura De Betão Armado Do Edifício Reitor Rezende Ribeiro De Rezende - Asa Sul, Brasília. Brasília(DF): UDF.
- MOREIRA, A. L. A., 2007. A Estrutura Do Palácio Da Justiça Em Brasília: Aspectos Históricos, Projeto, Execução, Intervenções E Proposta De Estratégias Para Manutenção. Brasília(DF): UnB.
- NASCIMENTO, Carlos Fernando Gomes do et al. Influência do agregado reciclado na durabilidade do betão armado frente à corrosão de armadura desencadeada por carbonatação acelerada. ResearchGate, 2021. Disponível em: . Acesso em: 31 maio 2025.
- OLIVEIRA, M. H. D. et al., 2018. Metodologia Para Diagnóstico De Pontes E Viadutos Em Betão Armado - Estudo De Caso. Brasília(DF): UnB.
- PEDRO, J. B.; VILHENA, A.; PAIVA, J. V.; BENTO, J.; COELHO, A. B. Método de Avaliação das Necessidades de Reabilitação: Concepção, Aplicação Experimental e Formação de Técnicos Avaliadores. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório nº 267/2008 – DED/NAU.
- REZENDE, L. R.; AGUIAR, J. B. Metodologia de gestão de risco em estruturas de betão com uso do FMEA. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 14, n. 4, p. 867–885, 2021.
- SANTOS, D. S., JUNIOR, M. M. D. S. & LIMA, S. F., 2018. Patologias Na Construção Civil De Habitações Do Programa Minha Casa Minha Vida - Estudo De Caso: Valparaíso - GO. Brasília (DF): UDF.
- SANTOS, JR, E. C. R. D., 2004. A Estrutura Do Palácio Do Itamaraty: Aspectos Históricos, Científicos E Tecnológicos De Projeto, Execução, Intervenções E Recomendações De Manutenção. Brasília(DF): UnB.
- SCHMIDT, A. S. & LIMA, L. D., 2017. Patologias Na Estrutura Do Congresso Nacional (Prédio Da Câmara Dos Deputados). Brasília(DF): UDF.
- SHOHET, I. M.; PACIUK, M. Service life prediction of buildings. Journal of Construction Engineering and Management, v. 130, 2004.
- SILVA, A. S.; MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. R. L. Gestão da durabilidade em obras de infraestrutura: práticas e desafios. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 12, n. 5, p. 1142–1165, 2019.
- SILVA, L. S. P. D., 2008. Estruturas Do Monumento A Caxias E Do Teatro Pedro Calmon Em Brasília: Histórico Nde Projeto, Execução E Intervenções E Estratégias Para Manutenção. Brasília(DF): UnB.
- SINGH, V.; KAUR, H.; KUMAR, M. "Damage Identification in RC Joints using FBG Sensors", Journal of Structural Monitoring, 2020.
- SKALNY, J.; MARCHAND, J.; PIVIN, I. Sulfate attack on concrete. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- SOUZA, M. D. O., 2018. Estudo Das Patologias Do Prédio Da Reitoria Da Universidade De Goiás. Anápolis(Go): s.n.
- SOUZA, V. C. M. & RIPPER, T., 1998. Patologia, Recuperação E Reforço De Estruturas De Betão. 1ª Edição ed. São Paulo (SP): PINI.
- TANAKA, H. et al. Digital twin applications in construction quality control. Automation in Construction, v. 112, 2020.
- TEATINI, J. C. & NEPOMUCENO A.A., 2023. Metodologia GDE" - Uma Revolução na Estimativa de Danos em Estruturas de Betão.
- TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

VERLY, R. C., 2015. Avaliação De Metodologias De Inspeção Como Instrumento De Priorização De Intervenções Em Obras De Arte Especiais. Brasília (DF): s.n.

WENDNER, R. et al. Optimization of the B4 model for multi-decade creep and shrinkage prediction. *Concrete Structures*, v. 20, p. 45-59, 2019.

WIKIPEDIA. Ponte Morandi collapse. Disponível em: [Ponte Morandi collapse]. Acesso em: 4 jun. 2025

ZHANG, L. et al. LiDAR-based structural assessment: Recent advances and applications. *Journal of Structural Engineering*, v. 149, n. 3, 2023

APÊNCIDE I – Análise dos elementos

Pilares



Base do Pilar 01, Fissura aproximada de 1,0 mm

Grau de deterioração do pilar 1

Nome do Elemento	Pilar 01			Croquis/Observações
Local	Ver croqui.			
Danos	F _p	F _i	D	
Carbonatação do betão	3			
Cobrimento Deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	5			
Desplacamento	4			
Eflorescência	4			
Falha na Concretagem	3			
Fissuras	2	3	16	
Flechas	5			
Infiltração	5	2	8	
Manchas	3	2	4,8	
Somatório			28,8	



Base do Pilar 02, Fissura aproximada de 0,2 mm

Grau de deterioração do pilar 2

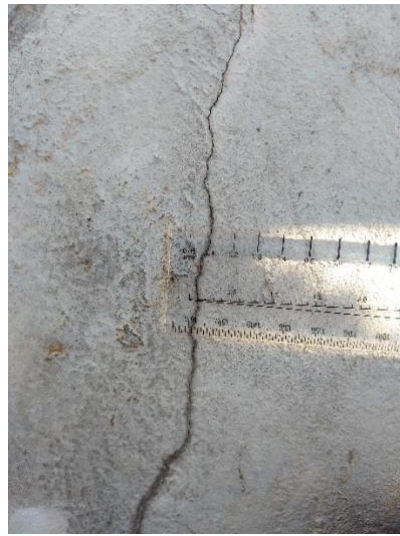
Nome do Elemento	Pilar 02			
Local	Ver croqui.			
Danos	F _p	F _i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do betão	3			
Cobrimento Deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	5			
Desplacamento	4			
Eflorescência	4			
Falha na Concretagem	3			
Fissuras	2	1	1,6	
Flechas	5			
Infiltração	5	2	8	
Manchas	3	2	4,8	
Somatório			14,4	



Base do Pilar 03, Fissura aproximada 0,3mm

Grau de deterioração do pilar 3

Nome do Elemento	Pilar 03			
Local	Ver croqui.			
Danos	F _p	F _i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do betão	3			
Cobrimento Deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	5			
Desplacimento	4			
Eflorescência	4			
Falha na Concretagem	3			
Fissuras	2	1	1,6	
Flechas	5	2	8	
Infiltração	5			
Manchas	3	2	4,8	
Somatório			14,4	



Base do Pilar 04, Fissura aproximada de 0,1 mm

Grau de deterioração do pilar 4

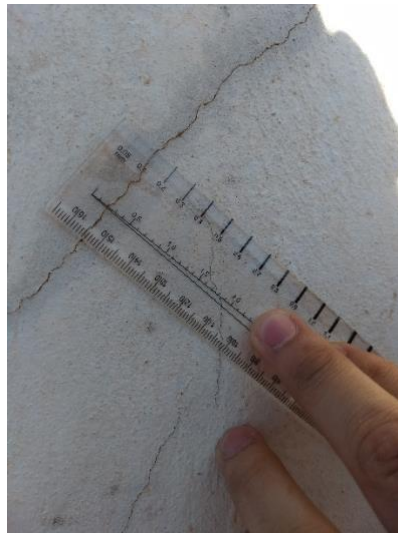
Nome do Elemento	Pilar 04			
Local	Ver croqui.			
Danos	F _p	F _i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do betão	3			
Cobrimento Deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	5			
Desplacamento	4			
Eflorescência	4			
Falha na Concretagem	3			
Fissuras	2	1	1,6	
Flechas	5			
Infiltração	5	2	8	
Manchas	3	2	4,8	
Somatório			14,4	



Base do Pilar 05, Fissura aproximada de 0,3 mm

Grau de deterioração do pilar 5

Nome do Elemento	Pilar 05			Croquis/Observações
Local	Ver croqui.			
Danos	F _p	F _i	D	
Carbonatação do betão	3			
Cobrimento Deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	5			
Desplacamento	4			
Eflorescência	4			
Falha na Concretagem	3			
Fissuras	5	1	1,6	
Flechas	5			
Infiltração	5	2	8	
Manchas	3	2	4,8	
Somatório			14,4	



Base do Pilar 06, Fissura aproximada de 0,1 mm

Grau de deterioração do pilar 6

Nome do Elemento	Pilar 06			
Local	Ver croqui.			
Danos	F _p	F _i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do betão	3			
Cobrimento Deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	5			
Desplacamento	4			
Eflorescência	4			
Falha na Concretagem	3			
Fissuras	2	1	1,6	
Flechas	5			
Infiltração	5	2	8	
Manchas	3	2	4,8	
Somatório			14,4	



Base do Pilar 07, Fissura aproximada de 1,4 mm

Grau de deterioração do pilar 7

Nome do Elemento	Pilar 07		
Local	Ver croqui.		
Danos	F _p	F _i	D
Carbonatação do betão	3		
Cobrimento Deficiente	3		
Contaminação por cloretos	4		
Corrosão de armaduras	5		
Desagregação	5		
Desplacamento	4		
Eflorescência	4		
Falha na Concretagem	3		
Fissuras	3	3	24
Flechas	5		
Infiltração	5	2	8
Manchas	3	2	4,8
Somatório			36,8



Base do Pilar 08, Fissura aproximada de 0,4 mm

Grau de deterioração do pilar 8

Nome do Elemento	Pilar 08			
Local	Ver croqui.			
Danos	F _p	F _i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do betão	3			
Cobrimento Deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	5			
Desplacamento	4			
Eflorescência	4			
Falha na Concretagem	3			
Fissuras	2	1	1,6	
Flechas	5			
Infiltração	5	2	8	
Manchas	3	2	4,8	
Somatório			14,4	



Base do Pilar 09, Fissura aproximada de 0,5 mm

Grau de deterioração do pilar 9

Nome do Elemento	Pilar 09		
Local	Ver croqui.		
Danos	F _p	F _i	D
Carbonatação do betão	3		
Cobrimento Deficiente	3		
Contaminação por cloretos	4		
Corrosão de armaduras	5		
Desagregação	5		
Desplacamento	4		
Eflorescência	4	2	6,4
Falha na Concretagem	3		
Fissuras	2	1	1,6
Flechas	5		
Infiltração	5	2	8
Manchas	3	2	4,8
Somatório			20,8



Base do Pilar 10, Fissura aproximada de 0,9 mm

Grau de deterioração do pilar 10

Nome do Elemento	Pilar 10			
Local	Ver croqui.			
Danos	F _p	F _i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do betão	3			
Cobrimento Deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	5			
Desplacimento	4			
Eflorescência	4	1	3,2	
Falha na Concretagem	3			
Fissuras	2	2	3,2	
Flechas	5			
Infiltração	5	2	8	
Manchas	3	2	4,8	
Somatório			19,2	



Base do Pilar 11, Fissura aproximada de 0,3 mm

Grau de deterioração do pilar 11

Nome do Elemento	Pilar 11		
Local	Ver croqui.		
Danos	F _p	F _i	D
Carbonatação do betão	3		
Cobrimento Deficiente	3		
Contaminação por cloretos	4		
Corrosão de armaduras	5		
Desagregação	5		
Desplacamento	4		
Eflorescência	4		
Falha na Concretagem	3		
Fissuras	2	1	1,6
Flechas	5		
Infiltração	5	2	8
Manchas	3	2	4,8
Somatório			14,4



Base do Pilar 12, Fissura aproximada de 0,1 mm

Grau de deterioração do pilar 12

Nome do Elemento	Pilar 12		
Local	Ver croqui.		
Danos	F _p	F _i	D
Carbonatação do betão	3		
Cobrimento Deficiente	3		
Contaminação por cloretos	4		
Corrosão de armaduras	5		
Desagregação	5		
Desplacamento	4		
Eflorescência	4		
Falha na Concretagem	3		
Fissuras	2	1	1,6
Flechas	5		
Infiltração	5	2	8
Manchas	3	2	4,8
Somatório			14,4



Base do Pilar 13, Fissura aproximada de 0,4 mm

Grau de deterioração do pilar 13

Nome do Elemento	Pilar 13			
Local	Ver croqui.			
Danos	F _p	F _i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do betão	3			
Cobrimento Deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	5			
Desplacamento	4			
Eflorescência	4			
Falha na Concretagem	3			
Fissuras	2	1	1,6	
Flechas	5			
Infiltração	5	2	8	
Manchas	3	2	4,8	
Somatório			14,4	



Base do Pilar14, Fissura aproximada de 0,2 mm

Grau de deterioração do pilar 14

Nome do Elemento	Pilar 14		
Local	Ver croqui.		
Danos	F _p	F _i	D
Carbonatação do betão	3		
Cobrimento Deficiente	3		
Contaminação por cloretos	4		
Corrosão de armaduras	5		
Desagregação	5		
Desplacamento	4	1	3,2
Eflorescência	4	1	3,2
Falha na Concretagem	3		
Fissuras	2	1	1,6
Flechas	5		
Infiltração	5	2	8
Manchas	3	2	4,8
Somatório			20,8



Base do Pilar 15, Fissura aproximada de 0,6 mm

Grau de deterioração do pilar 15

Nome do Elemento	Pilar 15			
Local	Ver croqui.			
Danos	F _p	F _i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do betão	3			
Cobrimento Deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	5			
Desplacamento	4			
Eflorescência	4			
Falha na Concretagem	3			
Fissuras	2	1	1,6	
Flechas	5			
Infiltração	5	2	8	
Manchas	3	2	4,8	
Somatório			14,4	



Base do Pilar 16, Fissura aproximada de 1,1 mm

Grau de deterioração do pilar 16

Nome do Elemento	Pilar 16			
Local	Ver croqui.			
Danos	F _p	F _i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do betão	3			
Cobrimento Deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	5			
Desplacamento	4			
Eflorescência	4			
Falha na Concretagem	3			
Fissuras	3	3	24	
Flechas	5			
Infiltração	5	2	8	
Manchas	3	2	4,8	
Somatório			36,8	

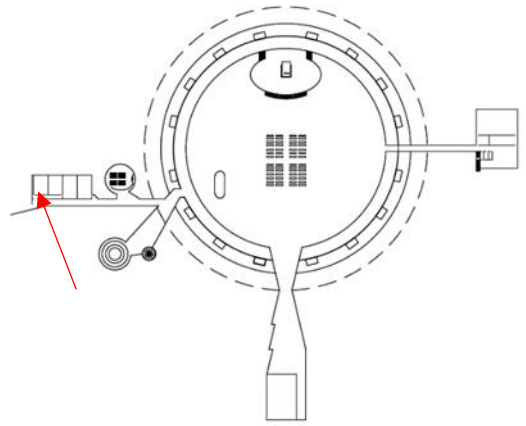
Lajes



Grau de deterioração da laje da sala de máquinas – Lajes 01

Nome do Elemento	Laje da Sala de máquinas			
Local	Ver croqui.			
Danos	F _p	F _i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do betão	3	2,5	6	
Cobrimento Deficiente	3	2	4,8	
Contaminação por cloretos	4			

Corrosão de armaduras	5	2	8
Desagregação	5	2,5	10
Desplacamento	5		
Eflorescência	3	2	4,8
Falha na Concretagem	3		
Fissuras	2		
Flechas	4		
Infiltração	3	1	2,4
Manchas	3	2	4,8
Total			40,8





Mancha de infiltração e fissuras

Grau de deterioração da laje ao redor da nave – Laje 02

Nome do Elemento	Laje ao redor da nave			Croquis/Observações
Local	Ver croqui.			
Danos	F _p	F _i	D	
Carbonatação do betão	3	3	24	
Cobrimento Deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	5			
Desplacamento	5			
Eflorescência	3			
Falha na Concretagem	3			
Fissuras	3	1	2,4	
Flechas	4			
Infiltração	3	2	4,8	
Manchas	3	2	4,8	
Total			36	



Laje Espelho d'água (interno/por baixo)

Grau de deterioração da laje do espelho d'água – Laje 03

Nome do Elemento	Laje do espelho d'água			Croquis/Observações
Local	Ver croqui.			
Danos	F _p	F _i	D	
Carbonatação do betão	3	4	60	
Cobrimento Deficiente	3	2	4,8	
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5	2	8	
Desagregação	5			
Desplacamento	5			
Eflorescência	3			
Falha na Concretagem	3			
Fissuras	3			
Flechas	4			
Infiltração	3			
Manchas	3	2	4,8	
G _{de}			77,6	



Fissura, Desplacamento



Fissura, Desplacamento

Grau de deterioração da laje do espelho d'água parte externa

Nome do Elemento	Laje do Espelho d'água – Laje 04				
Local	Ver croqui.				
Danos	F _p	F _i	D	Croquis/Observações	
Carbonatação do betão	3				
Cobrimento Deficiente	3	2	4,8		
Contaminação por cloretos	4				
Corrosão de armaduras	5				
Desagregação	5				
Desplacamento	5	2	8		
Eflorescência	3				
Falha na Concretagem	3				
Fissuras	3	3	24		
Flechas	4				
Infiltração	3				
Manchas	3	2	4,8		
		G _{de}	41,6		

Revestimentos



Trinca ao redor do altar, medida da trinca

Grau de deterioração da trinca que circunda o altar – Revestimento 01

Nome do Elemento	Trinca ao redor do altar		
Local	Ver croqui.		
Danos	F _p	F _i	D
Carbonatação do betão	3		
Cobrimento Deficiente	3		
Contaminação por cloretos	4		
Corrosão de armaduras	5		
Desagregação	5		
Desplacamento	3		
Eflorescência	3		
Falha na Concretagem	3		
Fissuras	4	3	32
Flechas	3		
Infiltração	3		
Manchas	3		
G _{de}			32



Trinca da Entrada principal, medida da trinca.

Grau de deterioração da Trinca da entrada principal que atravessa o salão – Revest 02

Nome do Elemento	Trinca da entrada principal			Croquis/Observações
Local	Ver croqui.			
Danos	F _p	F _i	D	
Carbonatação do betão	3			
Cobrimento Deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	5			
Desplacamento	3			
Eflorescência	3			
Falha na Concretagem	3			
Fissuras	4	3	32	
Flechas	3			
Infiltração	3			
Manchas	3			
G _{de}			32	



Deslocamento do revestimento

Grau de deterioração da laje da entrada inferior da catedral – Revest 03

Nome do Elemento	Laje da entrada inferior			
	Entrada de Veículos			
Local				
Danos	F _p	F _i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do betão	3			
Cobrimento Deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	5			
Desplacamento	3	2	4,8	
Eflorescência	3			
Falha na Concretagem	3			
Fissuras	4			
Flechas	3			
Infiltração	3	2	4,8	
Manchas	3	2	4,8	
	G _{de}		14,4	

Juntas de dilatação



Manchas de infiltração na junta de dilatação

Grau de deterioração da junta de dilatação – Junta 01

Nome do Elemento	Junta de dilatação		
Local	Ver croqui.		
Danos	F _p	F _i	D
Infiltração	3	2	4,8
Desgaste do Material de preenchimento da junta	3	2	4,8
Obstrução da junta	3	2	4,8
	G _{de}		14,4

Croquis/Observações



Junta de dilatação no espelho d'água

Grau de deterioração da junta de dilatação do espelho d'água – Juntas 02

Nome do Elemento	Junta de dilatação do espelho d'água		
Local	Ver croqui.		
Danos	F _p	F _i	D
Obstrução da Junta	5	2	8
Desgaste do Material de preenchimento da junta	3	2	4,8
Fissura paralela	3	2	4,8
	G _{de}		17,6

Croquis/Observações

Escadas e rampas



Desplacamento e corrosão da armadura e Eflorescência

Grau de deterioração da escada de acesso ao batistério - Rampas

Nome do Elemento	Escada do batistério			Croquis/Observações	
Local	Escada do batistério - Ala Oeste - Subsolo.				
Danos	F _p	F _i	D		
Carbonatação do betão	3	2	4,8		
Cobrimento Deficiente	3	2	4,8		
Contaminação por cloretos	4				
Corrosão de armaduras	5	3	40		
Desagregação	5				
Desplacamento	5	2	8		
Eflorescência	3	2	4,8		
Falha na Concretagem	3				
Fissuras	2	2	3,2		
Flechas	4				
Infiltração	3				
Manchas	3				
		G _{de}	65,6		



Manchas de infiltração, eflorescência e presença de fungos

Manchas de infiltração na escada do batistério - Escadas

Nome do Elemento	Escada de acesso ao batistério			Croquis/Observações
Local	Escada de acesso ao batistério, subsolo.			
Danos	F _p	F _i	D	
Carbonatação do betão	3			
Cobrimento Deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4	1	3,2	
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	5			
Desplacamento	5			
Eflorescência	3	2	4,8	
Falha na Concretagem	3			
Fissuras	2			
Flechas	4			
Infiltração	3	2	4,8	
Manchas	3	2	4,8	
G _{de}			17,6	

APÊNDICE II

PILARES	F _p	F _i	D	Σ	Gde	
$D = 0,8 F_i F_p$ para $F_i \leq 2,5$ $D = (12 F_i - 28) F_p$ para $F_i > 2,5$		$G_{de} = D_{m\acute{a}x} \left[1 + \frac{(\sum_{i=1}^n D_i) - D_{m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^n D_i} \right]$				
Pilar 01	Fissuras	2	3	16	28,8	23,11
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	5	2	8		
Pilar 02	Fissuras	2	1	1,6	14,4	11,56
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	5	2	8		
Pilar 03	Fissuras	2	1	1,6	14,4	11,56
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	5	2	8		
Pilar 04	Fissuras	2	1	1,6	14,4	11,56
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	5	2	8		
Pilar 05	Fissuras	2	1	1,6	14,4	11,56
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	5	2	8		
Pilar 06	Fissuras	2	1	1,6	14,4	11,56
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	5	2	8		
Pilar 07	Fissuras	3	3	24	36,8	32,35
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	5	2	8		
Pilar 08	Fissuras	2	1	1,6	14,4	11,56
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	5	2	8		
Pilar 09	Eflorescencia	4	2	6,4	20,8	12,92
	Fissuras	2	1	1,6		
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	5	2	8		
Pilar 10	Eflorescencia	4	1	3,2	19,2	12,67
	Fissuras	2	2	3,2		
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	5	2	8		
Pilar 11	Fissuras	2	1	1,6	14,4	11,56
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	5	2	8		
Pilar 12	Fissuras	2	1	1,6	14,4	11,56
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	5	2	8		

Pilar 13	Fissuras	2	1	1,6	14,4	11,56
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	5	2	8		
Pilar 14	Desplacamento	4	1	3,2	20,8	12,92
	Eflorescencia	4	1	3,2		
	Fissuras	2	1	1,6		
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	5	2	8		
Pilar 15	Fissuras	2	1	1,6	14,4	11,56
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	5	2	8		
Pilar 16	Fissuras	3	3	24	36,8	32,35
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	5	2	8		

Σ	Gdf
----------	-----

$$G_{df} = G_{de,m\acute{a}x} \left[1 + \frac{(\sum_{i=1}^m G_{de,i}) - G_{de,m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^m G_{de,i}} \right]$$

32,35	52,78
23,11	
32,35	
87,81	

LAJES	Fp	Fi	D	Σ	Gde
-------	----	----	---	----------	-----

$$D = 0,8 F_i F_p \quad \text{para } F_i \leq 2,5$$

$$D = (12 F_i - 28) F_p \quad \text{para } F_i > 2,5$$

$$G_{de} = D_{m\acute{a}x} \left[1 + \frac{(\sum_{i=1}^n D_i) - D_{m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^n D_i} \right]$$

Laje 01	Carbonatação	3	2,5	6	40,8	17,55
	Cobrimento deficiente	3	2	4,8		
	Corrosão	5	2	8		
	Desagregação	5	2,5	10		
	Eflorescência	3	2	4,8		
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	3	1	2,4		

Laje 02	Carbonatação	3	3	24	36	32,00
	Fissuras	3	1	2,4		
	Manchas	3	2	4,8		
	Infiltração	3	2	4,8		

Laje 03	Carbonatação	3	4	60	77,6	73,61
	Cobrimento deficiente	3	2	4,8		
	Corrosão	5	2	8		
	Manchas	3	2	4,8		

Laje 04	Cobrimento deficiente	3	2	4,8	41,6	34,15
	Desplacamento	5	2	8		
	Fissuras	3	3	24		
	Manchas	3	2	4,8		

Σ	Gdf
----------	------------

$$G_{df} = G_{de,m\acute{a}x} \left[1 + \frac{(\sum_{i=1}^m G_{de,i}) - G_{de,m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^m G_{de,i}} \right]$$

17,55	112,78
32	
73,61	
34,15	
157,31	

Juntas de dilatação	Fp	Fi	D	Σ	Gde
---------------------	----	----	---	----------	-----

$$D = 0,8 F_i F_p \quad \text{para } F_i \leq 2,5$$

$$D = (12 F_i - 28) F_p \quad \text{para } F_i > 2,5$$

$$G_{de} = D_{m\acute{a}x} \left[1 + \frac{(\sum_{i=1}^n D_i) - D_{m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^n D_i} \right]$$

Junta 01	Infiltração	3	2	4,8	14,4	8,00
	Desgaste do preenchimento	3	2	4,8		
	Obstrução da junta	3	2	4,8		

Juntas 02	Fissura	3	2	4,8	17,6	12,36
	Desgaste do preenchimento	3	2	4,8		
	Obstrução da junta	5	2	8		

Juntas de dilatação saem do cálculo final! (<15)

Revestimentos	Fp	Fi	D	Σ	Gde
----------------------	----	----	---	----------	-----

$$D = 0,8 F_i F_p \quad \text{para } F_i \leq 2,5$$

$$D = (12 F_i - 28) F_p \quad \text{para } F_i > 2,5$$

$$G_{de} = D_{m\acute{a}x} \left[1 + \frac{(\sum_{i=1}^n D_i) - D_{m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^n D_i} \right]$$

Revest 01	Fissuras	4	3	32	32	32,00
-----------	----------	---	---	----	----	-------

Revest 02	Fissuras	4	3	32	32	32,00
-----------	----------	---	---	----	----	-------

Revest 03	Deslocamento	3	2	4,8	14,4	8,00
	Infiltração	3	2	4,8		
	Manchas	3	2	4,8		

Σ	Gdf
----------	------------

$$G_{df} = G_{de,m\acute{a}x} \left[1 + \frac{(\sum_{i=1}^m G_{de,i}) - G_{de,m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^m G_{de,i}} \right]$$

32	48,00
32	
64	

Rampas e Escadas	Fp	Fi	D	Σ	Gde
-------------------------	----	----	---	----------	-----

$$D = 0,8 F_i F_p \quad \text{para } F_i \leq 2,5$$

$$D = (12 F_i - 28) F_p \quad \text{para } F_i > 2,5$$

$$G_{de} = D_{m\acute{a}x} \left[1 + \frac{(\sum_{i=1}^n D_i) - D_{m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^n D_i} \right]$$

Rampas	Carbonatação	3	2	4,8	65,6	55,61
	Cobrimento deficiente	3	2	4,8		
	Corrosão	5	3	40		
	Desagregação	5	2	8		
	Eflorescência	3	2	4,8		
	Fissuras	2	2	3,2		

Escadas	Contaminação fungos	4	1	3,2	17,6	8,29
	Eflorescência	3	2	4,8		
	Infiltração	3	2	4,8		
	Manchas	3	2	4,8		

Σ	Gdf
----------	------------

$$G_{df} = G_{de,m\acute{a}x} \left[1 + \frac{(\sum_{i=1}^m G_{de,i}) - G_{de,m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^m G_{de,i}} \right]$$

55,61	55,61
55,61	

$$G_d = \frac{\sum_{i=1}^k (F_{r,i} \cdot G_{df,i})}{\sum_{i=1}^k F_{r,i}}$$

Gdf Pilares	52,78	5	263,9
Gdf Lajes	112,8	4	451,2
Gdf Revest	48	1	48
Gdf Rampas	55,61	3	166,83
	Σ	13	929,93

GDE = 72

APÊNDICE 3

Aplicações do Método GDE/UnB

O método escolhido para esta análise teve início em 1994, com Eliane Kraus de Castro, e a passou a ser utilizado em inúmeros estudos sobre manifestações patológicas em estruturas de betão armado, sendo, mais tarde, adaptado também para OAE's (Obra de Arte Especial). A seguir, alguns exemplos de aplicação, escolhidos de uma grande gama de trabalhos já realizados, buscando ratificar a eficiência do método demonstrando sua utilidade. Uma série de monumentos históricos de Brasília foi estudada, trazendo à tona a importância da manutenção das edificações.

Tabela I - Casos Práticos Já Analisados. Fonte: Autoria própria, 2025.

Departamento de Engenharia Civil da UnB (CASTRO E. K., 1994)	Esta pesquisa propôs a metodologia para manutenção estrutural, com o objetivo de preencher a lacuna existente, estabelecendo critérios de quantificação para o grau de deterioração dos elementos isolados e da estrutura como um todo, baseando-se em parâmetros que consideram as manifestações mais frequentes de danos, sua evolução e a influência do meio ambiente em que a estrutura está inserida. Foi feita a análise do prédio que abriga o Departamento de Engenharia Civil da UnB. Com este trabalho nasceu a metodologia GDE/UnB, que depois passou por várias modificações.
Seis edifícios do Banco do Brasil (LOPES, 1998)	O objetivo deste estudo foi o aperfeiçoamento do sistema de manutenção predial denominado Siscop, desenvolvido e utilizado pelo Banco do Brasil desde 1989, visando a sua complementação com a inclusão do componente “estrutura”, utilizando a metodologia GDE/UnB, desenvolvida por Castro (1994), na Universidade de Brasília. Foram feitas as análises de 6 edifícios, mostrando a eficiência e utilidade para a manutenção de grandes estoques de edifícios.
Edificações no Âmbito do Exército Brasileiro (BOLDO, 2002)	O trabalho apresenta os resultados de avaliações efetuadas em quarenta edificações com estruturas de betão, realizadas por técnicos das CRO's (Comissões Regionais de Obras) e SRO's (Serviços Regionais de Obras) em vários estados brasileiros, sob supervisão do autor da dissertação. Com fatos positivos, ficou demonstrado o grande potencial da metodologia e constatou-se que a situação do estoque de edificações do Exército é, em geral, muito boa, visto que algumas das edificações apresentavam mais de 50 anos de idade, e já teriam esgotado o prazo de vida útil, fato digno de menção.
Palácio do Itamaraty (SANTOS.JR, 2004)	Este estudo teve como objetivo principal a análise do projeto estrutural do Palácio do Itamaraty, que, após avaliação in loco e análise através da metodologia GDE/UnB, pode-se concluir que esta estrutura se encontra em bom estado de conservação, necessitando de intervenção sem tempo estipulado. Também foi feita a análise pelo programa SAP2000 que mostrou que o padrão da construção utilizado foi excelente para a época, visto que o projeto estrutural se enquadra nos critérios de segurança atuais, inclusive se efeitos como a fluência do betão são levados em conta.
Instituto Central de Ciências da UnB (FONSECA, 2007)	Este trabalho avaliou a situação física da estrutura de betão do Instituto Central de Ciências (ICC), a maior e mais antiga edificação do campus da Universidade de Brasília (UnB) com 720

	<p>m de comprimento, projeto arquitetônico de Oscar Niemeyer. Foi utilizado o método GDE/UnB e o resultado alcançado mostrou que a estrutura se encontra no nível de deterioração sofrível, sendo sugerido um prazo de 6 meses para as intervenções propostas.</p>
<p>Palácio da Justiça de Brasília (MOREIRA, 2007)</p>	<p>O estudo teve como objetivo principal a avaliação das condições da estrutura do Palácio da Justiça, tendo em vista os aspectos de segurança, funcionalidade, durabilidade e estética. O resultado da avaliação estrutural, segundo a metodologia GDE/UnB, desenvolvida no PECC e com eficiência testada em diversos trabalhos, apontou para um estado de deterioração crítico, não compatível com uma edificação pertencente a um patrimônio cultural da humanidade.</p>
<p>Monumento a Caxias e Teatro Pedro Calmon, Brasília (SILVA L. S., 2008)</p>	<p>Objetivo principal do trabalho foi analisar as estruturas do Monumento a Caxias e do Teatro Pedro Calmon, criações de Oscar Niemeyer. Edificações situadas no Setor Militar Urbano (SMU) em Brasília, capital do Brasil e única cidade construída no século XX considerada pela Unesco (1987) Patrimônio Cultural da Humanidade. Os prédios foram considerados com grau de deterioração médio (entre 15-50), ou seja, necessitariam de novas inspeções em prazo máximo de 2 anos.</p>
<p>Teatro Nacional Claudio Santoro em Brasília (SOUZA D. A., 2009)</p>	<p>Teve por objetivo analisar a estrutura de betão do Teatro Nacional em Brasília, uma edificação semienterrada, com projeto arquitetônico de Oscar Niemeyer e cálculo estrutural de Bruno Contarini. Apesar da edificação apresentar, na época, cerca de 49 anos, os resultados da avaliação da estrutura, segundo a metodologia GDE/UnB indicaram um grau de deterioração baixo, sendo sugerido que sejam planejadas atividades de manutenção preventiva, com o objetivo de garantir a segurança, funcionalidade e estética da edificação.</p>
<p>Automatização no EXCEL e aplicação em um edifício em construção (BEZERRA, 2011)</p>	<p>Mostra a automatização do método GDE/UnB, para quantificação do grau de deterioração de estruturas de betão a fim de simplificar sua utilização para a análise de estruturas, e a análise de conservação de uma edificação ainda em construção, que recebeu grau 103,35, considerado crítico, quando é sugerida intervenção imediata. Deve-se levar em consideração a subjetividade do método, visto que cada avaliador terá uma visão diferente sobre os danos nos elementos.</p>
<p>Estudo de 11 pontes em Goiás (EUQUERES, 2011)</p>	<p>O objetivo deste trabalho foi desenvolver e aplicar uma metodologia para inspeção especial das estruturas de pontes de betão armado por meio da análise quantitativa do grau de deterioração das estruturas. Foram feitas adaptações e aplicou-se o GDE a 11 pontes e concluiu-se que a metodologia é válida e de grande importância para que órgãos públicos e vistoriadores tomem decisões quanto ao melhor prazo e melhor elemento estrutural a ser reabilitado, podendo ele ser um elemento isolado, uma ou mais famílias de elementos ou a estrutura como um todo.</p>
<p>Inspeção em 22 OAE's em Brasília (VERLY, 2015)</p>	<p>Neste trabalho foi feita a avaliação de 22 viadutos e pontes do Distrito Federal, sob duas perspectivas: o método GDE/UnB e o método do DNIT para inspeção de obras de arte. Ao final, foi proposta uma modificação no método GDE da versão anterior, a fim de adaptá-lo às obras de arte. Diante desta pequena modificação, o método apresentou-se eficiente e útil não só para</p>

	estruturas em betão armado em geral, mas também para as pontes e viadutos.
Ponte do Rio do Carmo, Natal – RN (MEDEIROS, 2015)	As manifestações patológicas sobre a ponte do Rio do Carmo foram identificadas utilizando duas metodologias de inspeções: norma DNIT 010/2014 e a GDE/UnB. De acordo com o levantamento, quantificou-se o grau de deterioração da estrutura. Pela norma DNIT a estrutura foi caracterizada como potencialmente problemática e pelo GDE como nível alto de deterioração (64,03). Comparando os dois métodos, o GDE mostrou-se com maior riqueza de detalhes e coerente com a análise do outro método.
Inspeção de 4 OAE's na região do Distrito Federal (COSTA, 2016)	Aplicou-se a metodologia, na versão 2015, em 4 viadutos do Distrito Federal, que foram avaliados de acordo com os procedimentos prescritos pelo método. As patologias foram quantificadas e constatou-se o melhor curso de ação a ser tomado a partir dos resultados. Dos 4 estudos de caso, 3 mostraram-se com grau baixo de deterioração, sendo o estado destes aceitável e recomendada a manutenção preventiva, e 1 caso com grau médio, sendo recomendada a definição de prazo para nova inspeção.
Ponte do Bragueto, Brasília (FERREIRA, 2016)	Propõe a aplicação da metodologia GDE/UnB para a análise da Ponte do Bragueto – DF com intuito de verificar a sua eficiência como ferramenta de avaliação de estruturas de betão, assim como base para gestão de atividades de manutenção necessárias. Foi possível concluir que a ponte está em estado sofrível, com incidências predominantes de manchas escuras e indícios de umidade, necessitando de intervenções em curto prazo.
Congresso Nacional (Câmara dos Deputados) (SCHMIDT & LIMA, 2017)	A pesquisa relata o estudo das principais patologias que ocorrem no Congresso Nacional, na parte do prédio onde fica abrigada a Câmara dos Deputados. A estrutura é mista e apresenta vários danos em elementos estruturais e de arquitetura. Após análise pelo método GDE/UnB concluiu-se que a estrutura apresenta grau de dano alto (73,4), em que as recomendações são definir prazo para inspeção especializada e planejar intervenção em médio prazo (1 ano).
Torre de TV Digital, Brasília (SOARES, 2017)	A Torre de TV Digital foi o último projeto arquitetônico de Oscar Niemeyer, calculada pelo engenheiro José Carlos Sussekind. São 182 metros de altura, dos quais 120 m em betão armado e 62 m em estrutura metálica. Apesar de ser uma obra nova, de 2012, apresenta diversas patologias e já foi fechada para visitação por causa de problemas estruturais já identificados. Foi utilizado o programa SAP2000 e o método GDE/UnB para a avaliação. Concluiu-se que o grau de deterioração, em geral, é médio (ficou entre 15-50), portanto há a necessidade de se traçar um planejamento de intervenções em no máximo 2 anos, mas, alguns elementos apresentam danos maiores, sendo necessário cuidado imediato.
Edifício da Reitoria da Universidade Estadual de Goiás (SOUZA M. D., 2018)	Este trabalho de conclusão de curso (TCC) teve como objetivo a avaliação, com o método GDE/UnB (2015), do então estado da estrutura do prédio da Administração Central (prédio da reitoria) da Universidade Estadual de Goiás, em Anápolis/GO. A estrutura é composta por 4 blocos com área construída de 10.605,40 m ² . O grau de deterioração obtido foi de 92,55, considerado sofrível.

	Foram propostas intervenções em cada elemento analisado e sugerido um roteiro de manutenções.
Edifício Sede da UDF (BAZAGA, VITOR, & ALVES, 2018)	Relata o estudo das manifestações patológicas no edifício sede do Centro Universitário do Distrito Federal – UDF, faz um levantamento geral do grau de degradação do edifício. Foi utilizado o método GDE/UnB e concluiu-se que o grau de deterioração da estrutura é médio (entre 15-50), sendo sugerido pelo método planejamento de intervenção para um prazo de 2 anos.
Edifício 4R – UDF, Brasília (MELO, SANTOS, & ALVES, 2018)	Analisou as manifestações patológicas do edifício Reitor Rezende Ribeiro de Rezende (4R), que faz parte do campus do Centro Universitário do Distrito Federal – UDF. O prédio abriga os cursos de engenharia civil e arquitetura e os laboratórios afins. O grau de deterioração encontrado foi de 28, que é considerado médio e requer ações num prazo de 2 anos, ou seja, nova inspeção e planejamento de intervenções.
Congresso Nacional (ALVES & EVANGELISTA, 2018)	O trabalho teve como metodologia o GDE/UnB, e abrange todo o prédio do Congresso Nacional (Câmara e Senado) na sua parte externa. Foi quantificado o grau de deterioração dos elementos, de suas famílias, e da estrutura em geral. Chegou-se ao resultado de 58,2, considerado alto e é sugerido pelo método que seja feita nova inspeção no prazo de 1 ano e, assim, planejem-se as intervenções adequadas.
Habitações do Programa Minha Casa Minha Vida, Valparaíso – Goiás (SANTOS, JUNIOR, & LIMA, 2018)	O estudo permitiu conhecer as condições em que se encontram as habitações populares do programa Minha Casa Minha Vida, do Governo Federal, e a partir daí indicar as ações recomendadas pelo método. No caso, o valor para o grau de deterioração da estrutura foi de 12,2, que indica um estado aceitável, ou seja, somente manutenção preventiva é recomendada para a estrutura analisada.
Fachada de 4 Edifícios em Brasília – DF (CAMARGOS, CARVALHO, & COUTO, 2018)	O trabalho em questão traz a análise de patologias que se manifestaram nos revestimentos das fachadas de cinco edifícios residenciais constituídos por quatro pavimentos, situados no Cruzeiro Novo, cidade satélite de Brasília, levando em consideração sua posição. Após análise pelo GDE/UnB, concluiu-se que as fachadas são das mais para as menos prejudicadas da seguinte ordem: Oeste (nível crítico de deterioração), Leste (nível crítico de deterioração), Norte (nível sofrível de deterioração) e Sul (nível alto de deterioração).
Viaduto sobre a Galeria dos Estados (OLIVEIRA, et al., 2018)	Este laudo foi feito pelo Grupo de Estudos de Tecnologias da Engenharia Civil – GETEC da UnB, após a queda de um dos panos de laje do viaduto que ficava sobre a Galeria dos Estados. O estudo foi feito para averiguar condições do restante do viaduto e, assim, fazer as recomendações necessárias. Foi utilizado o método GDE/UnB, além de análise computacional com modelo não linear em elementos finitos. O resultado obtido pelo GDE foi de 240,33, ou seja, estado muito superior ao estado crítico, sendo recomendada a demolição do restante da estrutura.

APÊNDICE 4

Outras Metodologias de Inspeção

1 - Método IBAPE (Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia)

A inspeção predial constitui um instrumento técnico fundamental para a gestão da manutenção, diagnóstico precoce de manifestações patológicas e prevenção de colapsos estruturais. De acordo com o Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia (IBAPE), a inspeção é definida como uma atividade técnica especializada que visa avaliar as condições de desempenho, segurança, funcionalidade e durabilidade das edificações, por meio de vistorias visuais, medições e análise documental (IBAPE/SP, 2021).

No âmbito das estruturas de betão armado, essa atividade assume papel ainda mais relevante devido à complexidade dos mecanismos de degradação, à dificuldade de acesso a elementos ocultos e à necessidade de garantir a vida útil projetada. O IBAPE classifica as inspeções segundo níveis de profundidade, que vão desde a vistoria simples (nível 1), baseada em análise visual, até a inspeção técnica (nível 3), que envolve instrumentação especializada e ensaios não destrutivos, como ultrassom, pacometria e esclerometria (IBAPE, 2020).

O embasamento metodológico segue premissas técnicas alinhadas com as normas da ABNT, especialmente a NBR 16747:2020 (Inspeção Predial), a NBR 15575 (Desempenho das Edificações) e a NBR 7680 (Avaliação da resistência à compressão do betão in loco). Adicionalmente, o IBAPE adota princípios de engenharia diagnóstica, integrando conhecimentos de patologias construtivas, tecnologia dos materiais, análise de projetos e dados históricos da edificação.

A prática da inspeção estruturada proporciona subsídios objetivos à tomada de decisões quanto a intervenções corretivas, reformas e reforços estruturais. Além disso, permite a emissão de **laudos técnicos com responsabilidade legal**, frequentemente utilizados em perícias judiciais e ações civis públicas. A relevância acadêmica da metodologia reside na sua capacidade de sistematizar o conhecimento empírico sobre falhas construtivas, retroalimentando os ciclos de projeto, execução e manutenção com dados reais de desempenho em serviço (SOUZA; MELHADO, 2003).

Nível de inspeção

A inspeção técnica de edificações configura-se como uma etapa fundamental no processo de diagnóstico e manutenção do desempenho estrutural e funcional das construções. Para garantir a precisão e adequação dessa atividade às exigências normativas, a metodologia empregada é estratificada em diferentes níveis de profundidade, conforme apresentado na tabela 02, definidos de acordo com a complexidade da análise, os recursos tecnológicos empregados e os objetivos técnicos do laudo pericial.

Essa classificação encontra respaldo tanto nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), especialmente na ABNT NBR 14.531:2011, quanto nas diretrizes metodológicas propostas pelo Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia (IBAPE, 2023). A estratificação permite estabelecer critérios objetivos para a seleção do tipo de inspeção mais apropriado, considerando fatores como o grau de deterioração visível, histórico da edificação, riscos associados à falha estrutural e a necessidade de intervenções corretivas ou preventivas.

Além disso, essa sistematização confere maior rigor técnico e transparência às avaliações, sendo indispensável para a elaboração de diagnósticos confiáveis e juridicamente válidos, especialmente em contextos que envolvem responsabilidades civis, contratuais ou ambientais.

Nível	Escopo	Técnicas e Instrumentos	Aplicações Típicas
Nível 1 (Inspeção Visual)	Avaliação superficial, sem intervenção física. Identificação de anomalias evidentes.	Observação direta, registro fotográfico, entrevistas com usuários.	Vistorias preliminares para compra/venda.
Nível 2 (Inspeção Detalhada)	Análise patológica com equipamentos não destrutivos. Avaliação quantitativa de falhas.	fissurômetro, termografia infravermelha, martelo de Schmidt.	Perícias técnicas, avaliação pós-ocupação (APO).
Nível 3 (Inspeção Especializada)	Investigação invasiva com ensaios laboratoriais e cálculos estruturais.	Corrosão de armaduras, ensaios de resistência (slump test), tomografia.	Casos judiciais, colapsos parciais, reformas estruturais.

Tabela II - Níveis de inspeção (Adaptado de IBAPE, 2023 e Silva et al., 2020).

A inspeção técnica em edificações conforme apresentado pode ser dividida em até três níveis de profundidade: Inspeção Visual, Inspeção Técnica e Inspeção Aprofundada. Essa classificação permite adequar os procedimentos à complexidade do objeto avaliado, às patologias identificadas e aos objetivos do diagnóstico, otimizando recursos e aumentando a confiabilidade dos resultados (IBAPE, 2023; ABNT NBR 14.531, 2011).

- *Inspeção Visual*

A inspeção visual representa o nível inicial e fundamental da análise técnica, caracterizando-se por ser uma avaliação direta e não destrutiva da edificação. Realizada por profissionais capacitados, esta etapa consiste em uma observação minuciosa das condições aparentes das superfícies, sistemas construtivos e elementos estruturais, visando identificar manifestações patológicas evidentes, como fissuras, manchas de umidade, descolamentos e corrosão superficial (Silva et al., 2018).

O método baseia-se na inspeção de campo com o uso de ferramentas simples, como câmeras fotográficas, lanternas, trenas e equipamentos para medição básica (ex.: medidores de umidade). Em muitos casos, inclui a coleta de histórico da edificação e entrevistas com usuários para complementar as informações. Os resultados da inspeção visual subsidiam a decisão sobre a necessidade de aprofundamento dos estudos, definindo o escopo para níveis subsequentes.

Esse nível é amplamente utilizado para manutenção preventiva e diagnósticos iniciais, apresentando vantagens como rapidez e baixo custo, porém com limitações quanto à detecção de problemas ocultos ou internos (ABNT NBR 14.531, 2011).

- *Inspeção detalhada*

A inspeção detalhada ou técnica corresponde a um estágio intermediário, no qual são incorporados métodos instrumentais e testes não destrutivos ou parcialmente destrutivos para avaliação detalhada das condições construtivas. Nesta fase, além da inspeção visual, são empregados equipamentos especializados como ultrassom, medidores de carbono, pacômetros, termografia infravermelha, ensaios de dureza superficial e extração de amostras para análise laboratorial (Ferreira & Costa, 2019).

O objetivo principal é quantificar os danos, identificar as causas raízes das patologias detectadas e avaliar a extensão e gravidade dos problemas estruturais e funcionais. Esta etapa demanda maior especialização técnica e pode envolver equipe multidisciplinar, incluindo engenheiros civis, arquitetos, especialistas em materiais e peritos ambientais.

A inspeção técnica é crucial para a elaboração de laudos detalhados e para a definição precisa das intervenções corretivas, assim como para apoiar a gestão da durabilidade das estruturas (IBAPE, 2023).

- *Inspeção especializada*

Este nível representa o estágio mais complexo e rigoroso de investigação, caracterizando-se por ensaios destrutivos, sondagens geotécnicas, modelagens computacionais e análises laboratoriais extensas. A inspeção aprofundada visa esclarecer com precisão os mecanismos patológicos, as condições estruturais internas e os riscos para a segurança e funcionalidade da edificação (Oliveira et al., 2021).

São comuns ações como extração de núcleos de betão, ensaios de resistência, monitoramento estrutural com sensores e instrumentação contínua, análises químicas e ambientais, além de avaliações normativas específicas. Este nível é indicado em situações de gravidade elevada, edificações históricas, obras de grande porte e em processos judiciais que demandam perícia técnica robusta.

A inspeção aprofundada fundamenta decisões estratégicas de reabilitação estrutural, reforço, substituição de elementos e planejamento de longo prazo, garantindo a segurança e prolongando a vida útil das construções (ABNT NBR 14.531, 2011).

Anomalias e falhas

A correta identificação e diferenciação entre anomalias e falhas é essencial para a análise técnica de edificações, influenciando diretamente o grau de intervenção necessário, a priorização de manutenções e a segurança estrutural. Esses conceitos, embora inter-relacionados, apresentam distinções fundamentais do ponto de vista técnico, normativo e funcional (ABNT NBR 15575, 2021; IBAPE, 2023).

- Anomalias: desvios do desempenho esperado

Anomalias referem-se a quaisquer desvios, alterações ou não conformidades que se afastam das condições ideais de funcionamento, segurança ou estética de um elemento construtivo. Nem toda anomalia compromete a estabilidade da estrutura — muitas vezes, trata-se de manifestações incipientes ou localizadas, tais como pequenas fissuras, eflorescência, ou deslocamentos superficiais (Melo & Medeiros, 2018).

De acordo com a ABNT NBR 15575 (2021), anomalias podem ser classificadas como:

- Funcionais: interferem na usabilidade da edificação (ex.: vazamentos, portas que não fecham corretamente).
- Estéticas: afetam a aparência visual, sem comprometer o desempenho estrutural (ex.: manchas, descoloração).
- Estruturais incipientes: indicam possível evolução para falhas se não forem tratadas (ex.: microfissuras repetitivas).

A identificação precoce dessas ocorrências, por meio de inspeções periódicas, é uma das ferramentas mais eficazes para garantir a longevidade das edificações.

- Falhas: comprometimento do desempenho e da segurança

Por sua vez, falhas são ocorrências mais severas, caracterizadas pelo comprometimento real do desempenho previsto para a estrutura, podendo afetar sua integridade, segurança ou funcionalidade. Elas resultam, muitas vezes, da evolução de anomalias não tratadas, de erros de projeto, de execução inadequada ou de uso indevido (Helene & Andrade, 1993).

Exemplos clássicos de falhas incluem:

- Fissuração estrutural generalizada com perda de rigidez.
- Colapso parcial de elementos (lajes, vigas ou pilares).
- Infiltrações com armadura exposta e corrosão avançada.
- Recalques diferenciais acentuados.

As falhas exigem intervenções corretivas imediatas, podendo demandar reforços estruturais, substituição de componentes e, em casos extremos, interdição do imóvel.

- Interface com o diagnóstico técnico

Durante a inspeção técnica, o reconhecimento adequado de anomalias e falhas permite classificar a gravidade das ocorrências e orientar os próximos passos — desde monitoramento até intervenções de emergência. A utilização de ferramentas como fichas de diagnóstico padronizadas, modelagens computacionais e ensaios in situ auxilia na tomada de decisões fundamentadas (Silva et al., 2020). A Tabela III apresenta um resumo comparativo entre anomalias e falhas, quanto à origem, gravidade, impacto e tratamento recomendado:

Critério	Anomalias	Falhas Técnicas
Definição	Desvios localizados ou alterações que não comprometem, de imediato, a segurança estrutural.	Comprometimentos significativos da segurança, funcionalidade ou estabilidade.
Gravidade	Baixa a moderada.	Moderada a alta.
Impacto funcional	Pode causar desconforto ou perda estética, mas a edificação permanece utilizável.	Pode inviabilizar o uso parcial ou total da edificação.
Impacto estrutural	Geralmente inexistente ou incipiente.	Presente, podendo evoluir para colapso parcial ou total.
Exemplos comuns	Fissuras superficiais, eflorescência, deslocamento de revestimento.	Fissuração estrutural generalizada, recalque excessivo, colapso de elementos.
Evolução ao longo do tempo	Pode se agravar e se transformar em falha se não tratada.	Tendência de agravamento acelerado.
Urgência da intervenção	Monitoramento e manutenção programada.	Intervenção corretiva imediata e prioritária.
Método de identificação	Inspeção visual ou ensaios simples.	Necessita inspeção detalhada e análises técnicas aprofundadas.
Abordagem técnica recomendada	Monitoramento, correção estética ou funcional.	Reforço estrutural, substituição de elementos ou interdição.

Tabela III - Comparativo entre Anomalias e Falhas Técnicas em Edificações (Adaptado de IBAPE (2023), ABNT NBR 15575 (2021)).

Além disso, é recomendável o uso de sistemas de classificações (como os propostos pela ABNT NBR 5674:2012) para hierarquizar e planejar ações de manutenção preventiva ou corretiva com base em critérios técnicos e econômicos.

Grau de risco

A inspeção técnica de estruturas de betão armado, conforme sistematizada pelo Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia (IBAPE), revela-se como ferramenta essencial na manutenção da integridade física das edificações e na prevenção de falhas de desempenho. A adoção de metodologias estruturadas, baseadas em inspeção visual, análise documental e ensaios não destrutivos, proporciona uma abordagem diagnóstica robusta, capaz de identificar precocemente manifestações patológicas e orientar intervenções com base técnica e jurídica sólida.

Do ponto de vista acadêmico, a contribuição do IBAPE transcende o escopo técnico, ao fomentar a padronização de procedimentos e a qualificação da engenharia diagnóstica no Brasil. O rigor metodológico proposto pelas diretrizes da instituição permite que as inspeções sejam inseridas em um ciclo virtuoso de retroalimentação do conhecimento, viabilizando a análise crítica do desempenho real das edificações e a contínua atualização das práticas de projeto e execução.

Em contextos nos quais a durabilidade das estruturas é diretamente afetada por fatores ambientais agressivos, falhas construtivas ou ausência de manutenção, a inspeção predial técnica se impõe como instrumento preventivo e corretivo de alta relevância. Assim, conclui-se que o fortalecimento da cultura de inspeções regulares, conforme preconizado pelo IBAPE, é não apenas uma exigência técnica, mas um imperativo para a sustentabilidade das construções urbanas contemporânea

2 - Método GUT (Gravidade, Tendência, Urgência)

O método GUT (Gravidade, Urgência e Tendência) configura-se como uma ferramenta analítica eficaz e objetiva para a priorização de falhas estruturais, especialmente em contextos em que múltiplas manifestações patológicas competem por atenção. Sua aplicação permite classificar e hierarquizar ocorrências com base em critérios racionais, considerando o potencial impacto da falha, a urgência da intervenção e a probabilidade de agravamento ao longo do tempo.

A priorização de manifestações patológicas em estruturas de betão armado demanda mais do que conhecimento técnico específico sobre o comportamento dos materiais e sistemas estruturais; exige também métodos sistemáticos de análise que orientem decisões em cenários de recursos limitados. Diante da multiplicidade de danos possíveis — com diferentes graus de risco, complexidade e custo de reparo — o uso de uma abordagem estruturada como o método GUT torna-se essencial para a gestão técnica eficaz.

Essa metodologia contribui diretamente para uma tomada de decisão mais assertiva, auxiliando na alocação racional de recursos, no planejamento de ações corretivas e na definição de medidas preventivas. Ao permitir a quantificação da criticidade de cada manifestação, o GUT favorece uma gestão proativa e baseada em evidências.

O conceito do método GUT fundamenta-se no produto de três variáveis de avaliação:

- Gravidade (G): Refere-se ao grau de impacto que o problema pode causar se não for solucionado, englobando possíveis consequências estruturais, funcionais,

financeiras, ambientais ou de segurança. Atribui-se uma pontuação de 1 (impacto irrelevante) a 5 (impacto gravíssimo).

- Urgência (U): Indica o tempo disponível para agir antes que o problema se agrave. Quanto menor o tempo de resposta necessário, maior a pontuação. A escala varia de 1 (pode aguardar) a 5 (ação imediata).
- Tendência (T): Avalia a velocidade e a probabilidade de progressão do problema caso não haja intervenção. Utiliza-se uma escala de 1 (não tende a piorar) a 5 (agrava-se rapidamente).

A pontuação final é obtida por meio da multiplicação dos três fatores ($G \times U \times T$), resultando em um valor numérico que permite ordenar as manifestações de acordo com sua prioridade de tratamento: quanto maior o resultado, maior a necessidade de intervenção imediata, conforme apresentado pela tabela IV.

Faixa GUT ($G \times U \times T$)	Classificação da Prioridade	Necessidade de Intervenção
1 a 20	Muito baixa	Pode ser monitorada, sem ação imediata
21 a 40	Baixa	Acompanhar e incluir em planejamento futuro
41 a 60	Moderada	Intervenção recomendada em médio prazo
61 a 80	Alta	Intervenção necessária no curto prazo
81 a 125	Muito alta	Intervenção imediata prioritária

Tabela IV - Classificação de prioridade (adaptada, CAMPOS (2004) e PALADINI (2012)).

3 – Método DNIT para avaliação de OAE's

As Obras de Arte Especiais (OAE's) tais como pontes, viadutos, passarelas e passagens inferiores, compõem elementos cruciais da infraestrutura de transportes terrestres, assegurando a transposição de obstáculos físicos (rios, vales, ferrovias ou vias urbanas) e garantindo a continuidade da malha viária. Sua função é essencial para o escoamento da produção, a mobilidade urbana e a integração logística entre regiões, impactando diretamente o desenvolvimento socioeconômico do país (IBRAHIM; PAIVA, 2015). Devido à sua relevância e aos altos custos de implantação e manutenção, essas estruturas são classificadas como ativos críticos, cuja gestão eficiente depende de sistemas de monitoramento, diagnóstico e intervenção tecnicamente fundamentados.

Nesse cenário, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) instituiu um sistema padronizado de inspeção, avaliação e classificação das condições estruturais das OAE's, com o objetivo de orientar ações preventivas e corretivas ao longo do ciclo de vida das estruturas. O método está fundamentado nos manuais DNIT 010/2004-PRO que trata da inspeção de obras de arte especiais, e DNIT 015/2004-PRO, que versa sobre diretrizes de manutenção (DNIT, 2004a; 2004b).

Embora o método DNIT represente um importante avanço na gestão sistemática das OAE's brasileiras, apresenta limitações. A principal refere-se à subjetividade da inspeção visual, especialmente em estruturas degradadas com sinais ambíguos. Ademais, o método não incorpora diretamente técnicas de ensaios não destrutivos (END's), que poderiam fornecer diagnósticos mais precisos em elementos ocultos ou inacessíveis (MEDEIROS;

HELENE, 2009). Outra limitação é a **falta de diretrizes para priorização orçamentária**, o que compromete a gestão em cenários com recursos escassos.

Mesmo assim, o sistema DNIT é amplamente adotado por concessionárias, prefeituras e agências estaduais, contribuindo para a padronização e confiabilidade das avaliações técnicas.

Nota e Condições

O processo se inicia com a inspeção visual sistemática, realizada por técnicos com base em observação direta dos principais componentes da estrutura:

- Superestrutura: tabuleiros, vigas principais e transversinas;
- Mesoestrutura: pilares, encontros e apoios;
- Infraestrutura: fundações profundas e blocos de apoio;
- Elementos complementares: juntas de dilatação, sistemas de apoio, dispositivos de drenagem e guarda-corpos.

As anomalias identificadas são classificadas em três tipos, conforme sua severidade e potencial de comprometimento estrutural:

- Tipo I: Anomalias superficiais e não evolutivas, sem risco à estabilidade estrutural (ex.: fissuras capilares);
- Tipo II: Danos com indícios de comprometimento, exigindo monitoramento (ex.: corrosão inicial de armaduras);
- Tipo III: Anomalias críticas, com risco confirmado à segurança estrutural (ex.: fissuração ativa com deformação permanente).

Com base nas inspeções, cada componente avaliado recebe uma nota de 1 a 5, considerando o estado de conservação, a severidade das anomalias e a urgência de intervenção. A nota global da OAE é obtida por média ponderada, atribuindo maior peso a elementos estruturais críticos, como fundações e apoios principais.

A nota final é convertida no Índice de Condição da Obra (ICO), classificado conforme a Tabela V.

Nota	Classificação	Descrição Técnica	Ação Recomendada
5	Ótimo	Sem anomalias detectáveis.	Manutenção preventiva.
4	Bom	Anomalias leves (Tipo I).	Reparos pontuais.
3	Regular	Anomalias moderadas (Tipo II).	Intervenção em médio prazo.
2	Ruim	Anomalias graves (Tipo III).	Intervenção urgente.
1	Muito Ruim	Risco iminente de colapso.	Interdição/Reconstrução.

Tabela V - Classificação de prioridade (adaptado de DNIT, 2004a)

Conforme o valor do ICO, o DNIT define as **ações técnicas recomendadas**, que podem incluir monitoramento contínuo, manutenção corretiva, reforço estrutural ou substituição total de componentes (DNIT, 2004a).

4 - Método FMEA (failure mode and effect analysis)

O FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), ou Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos, é uma metodologia sistemática utilizada para identificar, priorizar e mitigar falhas potenciais em sistemas, componentes ou processos, antes que elas ocorram. Desenvolvido inicialmente para aplicações aeroespaciais e industriais, o método foi posteriormente adaptado para a área da engenharia civil, especialmente na avaliação de riscos associados à deterioração de estruturas complexas, como as Obras de Arte Especiais (OAE's).

Seu objetivo principal é analisar preventivamente os modos de falha possíveis, avaliar suas consequências (efeitos) e estabelecer ações corretivas ou preventivas com base em critérios de criticidade. No contexto de gestão de ativos de infraestrutura viária, o FMEA é uma ferramenta complementar à inspeção visual, pois permite estruturar decisões técnicas a partir da análise de risco e impacto operacional, mesmo em cenários com dados incompletos.

Estrutura Metodológica

O processo FMEA segue uma lógica matricial baseada em três parâmetros principais:

- Severidade (S): grau de impacto do modo de falha na funcionalidade da estrutura;
- Ocorrência (O): probabilidade de o modo de falha ocorrer;
- Detecção (D): capacidade de identificar o modo de falha antes que ele provoque danos.

Com base nesses critérios, calcula-se o Número de Prioridade de Risco (RPN – Risk Priority Number).

Os valores de cada parâmetro variam tipicamente de 1 a 10, sendo que quanto maior o RPN, mais urgente é a intervenção. A Tabela VI apresenta um exemplo simplificado de matriz FMEA aplicada a elementos de OAE's.

A tabela VI – Exemplo simplificado de matriz FMEA aplicada a vigas de betão armado

Modo de Falha	Efeito Potencial	S	O	D	RPN	Ação Recomendada
Corrosão de armadura	Perda de seção útil	8	6	4	192	Proteção catódica, reforço local
Fissura ativa	Instabilidade estrutural	9	4	3	108	Monitoramento e análise estrutural
Fadiga do betão	Ruptura progressiva	10	3	2	60	Inspeção com END e modelagem estrutural

Tabela VI -Matriz FMEA (autoria própria, 2025)

Aplicação em Obras de Arte Especiais

A aplicação do FMEA em OAEs permite antecipar falhas estruturais e priorizar intervenções, o que é particularmente útil em redes rodoviárias extensas, com grande número de obras e recursos técnicos e financeiros limitados. Em conjunto com os métodos normativos do DNIT, o FMEA contribui para:

- Hierarquização de prioridades de manutenção com base em risco;

- Registro histórico estruturado de falhas e suas causas;
- Tomada de decisão técnica justificada, mesmo em contextos com incertezas ou ausência de dados quantitativos.

Além disso, o FMEA pode ser integrado a sistemas informatizados de gestão de ativos (SIGA), ampliando sua aplicabilidade em órgãos públicos e concessionárias de infraestrutura rodoviária.

5 - Método de avaliação das necessidades de reabilitação – MANR

O Método de Avaliação das Necessidades de Reabilitação (MANR) é uma ferramenta técnico-metodológica desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), de Portugal, com o objetivo de subsidiar decisões relacionadas à reabilitação de edificações com base em critérios técnicos, funcionais, espaciais e urbanísticos. O MANR foi concebido no âmbito de programas de qualificação urbana, como a reabilitação do Bairro do Alto da Cova da Moura, e visa garantir que os edifícios atendam, minimamente, às exigências funcionais de habitabilidade, segurança e uso, conforme a legislação vigente ou, quando omissa, segundo regras da boa prática (Pedro et al., 2008).

Diferentemente de abordagens voltadas exclusivamente à manutenção ou ao desempenho estrutural, o MANR propõe uma avaliação abrangente e multidimensional, incorporando aspectos construtivos e morfofuncionais do edifício, além de sua inserção urbana.

Estrutura Metodológica

A aplicação do MANR está dividida em quatro grandes etapas metodológicas:

Inspeção visual técnica, com verificação de:

- Anomalias construtivas: relacionadas à execução deficiente, envelhecimento de materiais, uso inadequado, ou falta de manutenção;
- Anomalias espaciais: ligadas à organização dos espaços, ventilação, iluminação natural, acessibilidade, entre outros fatores de uso.

Avaliação da inserção urbanística, verificando relações entre os edifícios, obstruções entre fachadas, distâncias entre aberturas e conformidade com o traçado urbano.

Classificação das anomalias segundo três eixos:

- Gravidade (sem significado, ligeira, média, grave);
- Extensão (localizada, média, extensa, total);
- Complexidade da intervenção (simples, média, difícil).

Síntese quantitativa das informações, com cálculo do Índice de Necessidade de Reabilitação (Inr), que integra as pontuações ponderadas de cada elemento funcional. A fórmula geral de cálculo é:

$$\text{Inr} = \left(\frac{\sum(P_t)}{\sum(P_d)} \right) \times 100$$

Onde:

- O valor final do INR é categorizado em faixas, indicando a urgência da intervenção, conforme apresentado na tabela VII.

Intervalo do INR	Nível de Reabilitação	Descrição Técnica
0 a 33	Reabilitação Ligeira	Reparações superficiais; manutenção corretiva localizada
34 a 66	Reabilitação Média	Substituição de revestimentos; reorganização de instalações; reforços localizados
> 66	Reabilitação Profunda	Intervenções estruturais extensas; alterações significativas na compartimentação

Tabela VII - Níveis de reabilitação conforme índice INR (Pedro et al., 2008)

Além da classificação automática, o método permite ao técnico avaliador exercer julgamento profissional, ponderando aspectos não captáveis por análise puramente matricial, como restrições legais, características locais e impactos sociais.

Aplicabilidade em Políticas Públicas

O MANR se mostra especialmente eficaz para aplicação em programas de concessões rodoviárias, órgãos estaduais e municipais, onde a escassez de recursos impõe a necessidade de hierarquizar intervenções de forma objetiva e técnica. A integração com bancos de dados georreferenciados e sistemas de gestão de pontes amplia seu potencial, permitindo uma visão de rede e planeamento plurianual.

Além disso, sua estrutura multicritério permite ser customizado conforme características regionais, tipos estruturais predominantes e metas institucionais.

Ponderações e Instrumentos de Apoio

As ponderações dos elementos funcionais são baseadas em estudos históricos de custos construtivos adaptados à realidade portuguesa (Bezelga, 1984), distribuídas entre:

- Estrutura, cobertura e elementos salientes (peso conjunto de 30%);
- Outras partes comuns (paredes, escadas, instalações, etc.);
- Unidades habitacionais (portas, janelas, instalações sanitárias, cozinhas, etc.).

Para operacionalizar a aplicação do método, foram desenvolvidos três instrumentos principais:

- Ficha de avaliação, com campos organizados por parte da edificação;
- Manual de instruções, com descrição de critérios, escalas e exemplos;
- Folha de cálculo informatizada, que gera automaticamente o índice INR.

Aplicação Experimental e Limitações

A aplicação experimental do MANR no Bairro do Alto da Cova da Moura envolveu arquitetos e engenheiros civis do LNEC e do IHRU, evidenciando sua viabilidade técnica, repetibilidade entre avaliadores e utilidade decisória. Entretanto, o método apresenta algumas limitações, como:

- Restrição a análises visuais, sem sondagens destrutivas ou ensaios técnicos;
- Possibilidade de subnotificação de anomalias ocultas;

- Dependência do contexto normativo local, exigindo adaptação em outros países ou tipologias;
- Não substitui os processos formais de licenciamento e fiscalização urbanística.

O MANR representa uma importante ferramenta para políticas públicas de reabilitação urbana, ao permitir uma avaliação objetiva e padronizada da necessidade de intervenção em edificações. Sua abordagem sistemática, aliada à simplicidade de aplicação e fundamentação técnica clara, o torna especialmente útil em contextos com múltiplas unidades a serem avaliadas, como programas habitacionais, conjuntos de edifícios públicos ou zonas urbanas vulneráveis.

Para aplicação em outras realidades (como edifícios de uso não residencial, edificações patrimoniais ou infraestruturas), recomenda-se revisar os critérios, pesos e escalas de avaliação, mantendo a lógica matricial e a orientação funcional do método.

6 - Método de certificação das condições mínimas de habitabilidade – MCH

O Método de Certificação das Condições Mínimas de Habitabilidade (MCH) é uma ferramenta metodológica utilizada para avaliar se uma edificação residencial atende aos critérios básicos de habitabilidade estabelecidos por normas técnicas e por princípios do direito à moradia adequada. O MCH surgiu da necessidade de sistematizar critérios técnicos que garantam o desempenho mínimo das habitações, especialmente em empreendimentos de interesse social. Seu desenvolvimento está alinhado à evolução da legislação habitacional brasileira e ao fortalecimento de políticas públicas que buscam assegurar o conforto, a segurança e a salubridade das moradias populares.

O método estrutura-se em torno de uma lista de verificação (checklist) baseada em parâmetros normativos, como a ABNT NBR 15575:2013 (Desempenho de Edificações Habitacionais), que trata de aspectos como estanqueidade, ventilação, iluminação, acessibilidade, funcionalidade dos ambientes, segurança contra riscos físicos e biológicos, entre outros. A aplicação do MCH ocorre por meio de inspeções técnicas, avaliações *in loco* e entrevistas com moradores, e os resultados são geralmente classificados em categorias como “Atende”, “Atende parcialmente” ou “Não atende”. Com isso, o MCH permite a identificação de deficiências construtivas e contribui com subsídios para diagnósticos técnicos e priorização de intervenções corretivas.

Pesquisas recentes em avaliações pós-ocupação (APO) vêm incorporando o MCH como base metodológica, especialmente no contexto de empreendimentos do programa Minha Casa Minha Vida (MCMV). Trabalhos como os de LIMA (2019) e OLIVEIRA (2018) demonstram a relevância do método na análise da efetividade habitacional e na identificação de inconformidades recorrentes em conjuntos populares. O MCH, portanto, não apenas representa uma ferramenta técnica de avaliação, mas também um instrumento que fortalece a gestão pública e a promoção da moradia digna como um direito social fundamental.

Com base em trabalhos como o de Lima (2019) e Oliveira (2018) podemos estruturar uma tabela de avaliação conforme o exemplo exposto na Tabela VIII abaixo.

Item Avaliado	Critério Técnico	Método de Verificação	Classificação	Observações
Estanqueidade da cobertura	Ausência de infiltrações	Inspeção visual		
Iluminação natural	Presença de aberturas adequadas em todos os ambientes	Medição e observação		
Ventilação cruzada	Existência de aberturas opostas nos principais ambientes	Planta baixa / vistoria		
Acessibilidade interna	Circulações sem barreiras físicas	Inspeção in loco		
Segurança nas instalações elétricas	Fiação aparente, aterramento e disjuntores	Inspeção visual + documentação		
Conforto térmico	Sombreamento, orientação solar, materiais	Observação + relato de usuário		
Presença de umidade nas paredes	Sinais de bolor, mofo ou descascamento	Inspeção visual		
Condições sanitárias	Banheiro funcional, com ventilação e escoamento adequado	Vistoria técnica		

Tabela VIII - Modelo de Avaliação das Condições Mínimas de Habitabilidade (MCH): (Autoria própria, 2025)

7 - Método de avaliação do estado de conservação dos imóveis – MAEC

O Método de Avaliação do Estado de Conservação dos Imóveis (MAEC), desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) na década de 2000, surge como resposta à necessidade de criar um sistema padronizado para diagnósticos prediais em contextos de reabilitação urbana. Diferentemente de abordagens meramente patológicas, como o tradicional MANR, o MAEC propõe uma avaliação holística que integra três dimensões fundamentais: a degradação física dos materiais, a funcionalidade dos sistemas construtivos e a adequação ao uso corrente. Esta tríade reflete uma compreensão avançada da conservação como processo dinâmico, onde interagem fatores intrínsecos (qualidade original da construção, propriedades dos materiais) e extrínsecos (intensidade de uso, manutenção histórica, exposição ambiental).

A metodologia foi concebida para suprir lacunas identificadas em políticas públicas portuguesas, particularmente no âmbito do Programa Especial de Realojamento (PER). Como demonstram Pedro et al. (2006a), a ausência de critérios uniformes para avaliação de conjuntos habitacionais resultava em diagnósticos incomparáveis, dificultando a alocação eficiente de recursos. O MAEC resolve esta questão através de um sistema de classificação baseado no Índice de Estado de Conservação (IEC), calculado a partir da inspeção visual sistemática de cinco domínios construtivos: estrutura e cobertura (com peso de 20-30% no cálculo final), vedações externas (15-25%), sistemas hidrossanitários e elétricos (15-20%), revestimentos (10-15%) e espaços comuns (5-10%). Esta hierarquização reflete a importância relativa de cada componente para a segurança e habitabilidade, conforme estabelecido nas diretrizes do LNEC para edificações multifamiliares.

O processo avaliativo inicia-se com a caracterização arquitetônica e construtiva do imóvel, documentando tipologia, sistemas predominantes e contexto urbano. Segue-se a inspeção minuciosa, onde cada elemento é classificado segundo parâmetros de gravidade

(impacto no desempenho, numa escala de 1 a 5), extensão (percentual da área afetada) e criticidade (risco associado à falha), conforme a fórmula do IEC:

$$IEC = \frac{\sum(E_i \cdot P_i)}{\sum P_i}$$

Onde:

- E_i - representa a nota do elemento e
- P_i - seu peso relativo

Esta fórmula resulta em um valor numérico cuja tabela IX faz classificações das faixas para estados que variam de muito a péssimos conforme podemos notar abaixo:

IEC	Classificação	Diretrizes de Intervenção
4.5+	Muito Bom	Manutenção preventiva
3.5-4.4	Bom	Pequenos reparos pontuais
2.5-3.4	Razoável	Intervenções corretivas setoriais
1.5-2.4	Ruim	Reabilitação integral necessária
<1.5	Péssimo	Emergência estrutural

Tabela IX – IEC (adaptada de Pedro et al. (2006b))

As aplicações do MAEC estendem-se além da gestão patrimonial, influenciando políticas urbanas. No Programa de Arrendamento Acessível (Portaria n.º 229/2018), o IEC tornou-se critério para seleção de imóveis a reabilitar, com priorização daqueles classificados entre "Razoável" e "Ruim" (IEC 1.5-3.4). Contudo, estudos de caso realizados em Lisboa (Fernandes, 2020) revelam limitações metodológicas quando aplicado a edificações anteriores a 1960: a ausência de avaliação de patologias ocultas (como corrosão de armaduras em alvenarias antigas) e a subvalorização de critérios históricos podem distorcer diagnósticos. Esta fragilidade é particularmente relevante em centros urbanos patrimoniais, onde o LNEC recomenda complementar o MAEC com ferramentas como o SIPAC (Sistema de Informação do Património Arquitetónico).

Em síntese, o MAEC representa um marco na sistematização de avaliações prediais, oferecendo um equilíbrio entre praticidade e rigor técnico. Sua principal contribuição reside na capacidade de gerar dados comparáveis para gestão em larga escala, embora sua aplicação em contextos específicos (patrimônio histórico, hospitais, infraestruturas críticas) ainda exija adaptações metodológicas.

8 - Método factorial

O Método Factorial é uma abordagem técnico-analítica que permite estimar a Vida Útil Estimada (VUE) de edificações com base em variáveis que influenciam diretamente seu desempenho ao longo do tempo. Esse método parte da premissa de que a vida útil não é um valor absoluto, mas sim um intervalo que depende de condições ambientais, construtivas, funcionais e operacionais específicas de cada empreendimento.

A metodologia foi inicialmente desenvolvida a partir da norma internacional ISO 15686 – Service Life Planning, e posteriormente adaptada por instituições de referência como o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em Portugal, e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), especialmente nas diretrizes da NBR 15575 (ABNT, 2013).

A aplicação do Método Fatorial vem ganhando espaço em auditorias técnicas, estudos de viabilidade e modelos de concessão, especialmente em países com normativas voltadas para desempenho ao longo do tempo. No Brasil, sua incorporação em sistemas BIM (Building Information Modeling) e plataformas de Facility Management tem permitido prever, simular e justificar planos de manutenção técnica com base científica.

A estimativa da vida útil, quando utilizada de forma integrada à avaliação de desempenho (ABNT NBR 15575) e aos métodos de inspeção como DNIT, MANR ou MAEC, fortalece a governança técnica do ciclo de vida da edificação, otimizando custos e reduzindo riscos operacionais.

Cálculo da VUE (vida útil estimada)

A premissa central do método é que a vida útil de uma edificação não é um valor fixo, mas sim uma função de diversos fatores inter-relacionados, que podem acelerar ou retardar seu processo de degradação. A VUE é calculada a partir da seguinte expressão:

$$VUE = VUR \times (A \times B \times C \times D \times E \times F \times G)$$

Onde:

- VUR (Vida Útil de Referência): Tempo esperado de desempenho adequado em condições padrão (ex: 50 anos para estruturas de betão armado, conforme NBR 15575).
- Fatores de ajuste (A a G): Coeficientes que modificam a VUR conforme as condições reais do imóvel, variando entre 0,8 (condição desfavorável) e 1,2 (condição favorável), conforme apresentado na tabela X.

Fator	Descrição	Exemplos e Impactos
A	Qualidade dos materiais e execução	Conformidade técnica, inspeção durante obra (1,0–1,2)
B	Condições ambientais	Clima, poluição, exposição solar ou salina (0,8–1,0)
C	Projeto e soluções construtivas	Detalhamento técnico, proteção de armaduras (0,9–1,1)
D	Tipo e intensidade de uso	Edifícios escolares ou hospitalares tendem a menor VUE (0,8–1,0)
E	Manutenção preventiva e corretiva	Plano de manutenção contínuo aumenta VUE (0,9–1,2)
F	Cargas atuantes e sobrecargas	Sobrecarga ou subutilização (0,8–1,0)
G	Inovação e tecnologias aplicadas	Materiais inteligentes, monitoramento automatizado (1,0–1,2)

Tabela X - Fatores do Método Fatorial (autoria própria, ISO (2011), ABNT (2013) e Pedro et al. (2012).

ANEXO I

(Metodologia GDE, Teatini e Nepomuceno, 2023, Editora UnB)

Tabela 4.1: Danos em estruturas de concreto usuais e fatores de intensidade (F_i)

Tipo de danos	F_i	Classificação dos danos frequentes
Carbonatação do concreto	1,0	Localizada, em regiões com $pH < 9$, sem afetar armaduras
	2,0	Localizada, afetando armaduras, mas ambiente seco
	3,0	Localizada, afetando armaduras, em ambiente úmido
	4,0	Generalizada, comprometendo armaduras e ambiente úmido
Cobrimento deficiente do concreto sobre armaduras	1,0	Atinge limites da Norma, mas sem visualizar armaduras
	2,0	Supera limites, mas armaduras visíveis/expostas em pequenas extensões
	3,0	Armaduras expostas em grandes extensões (F_i não é pontuado até 4,0, pois junto à corrosão produziria valores excessivos de graus de danos)
Contaminação do concreto por cloretos	2,0	Presença de cloretos: elementos abrigados sem umidade
	3,0	Presença de cloretos: elementos externos sem umidade
	4,0	Presença de cloretos: elementos em ambientes úmidos
Corrosão de armaduras	2,0	Manifestações leves, pequenas manchas
	3,0	Grandes manchas e/ou fissuras de corrosão
	4,0	Corrosão acentuada da armadura principal, perda relevante de seção das barras, passível de detecção visual e desagregação do concreto
Desagregação do concreto por ataques químicos	2,0	Manifestação inicial (principais: ataque por sulfatos, reação álcali-agregado)
	3,0	Manifestações leves, deterioração do concreto em 'placas' ou 'fatias'
	4,0	Perda acentuada de seções de concreto por desagregação
Deslocamento por empuxo	3,0	Deslocamento de elemento no sentido transversal ao eixo – estável
	4,0	Deslocamento de elemento no sentido transversal ao eixo – instável
Desvios de geometria	2,0	Pilares/cortinas com excentricidade relativa ao eixo: $e \leq h/100$ ($h = altura$)
	3,0	Pilares/cortinas com excentricidade relativa ao eixo: $h/100 \leq e < h/50$
	4,0	Pilares/cortinas com excentricidade relativa ao eixo: $e \geq h/50$
Eflorescência	1,0	Início de manifestações
	2,0	Manchas brancas de pequenas dimensões
	3,0	Manchas e crostas brancas de carbonato de cálcio em grandes extensões
	4,0	Grandes formações de crostas brancas e 'estalactites' no concreto
Falhas de concretagem (Segregação)	1,0	Superficiais e pouco significativas em relação às dimensões da peça
	2,0	Significativas e com alguma exposição de armaduras
	3,0	Significativas com ampla exposição de armaduras
	4,0	Perda relevante da seção transversal da peça ($\geq 20\%$ da área)

Fissuração excessiva	1,0 2,0 3,0 4,0	Fissuras visíveis, mas aberturas nos limites da Norma Fissuras com aberturas $\geq 40\%$ limites da Norma – Estabilizadas Fissuras com aberturas excessivas – Estabilizadas Aberturas excessivas – Não estabilizadas
Flechas e deslocamentos excessivos	1,0 2,0 3,0 4,0	Visíveis, <i>sem afetar</i> elementos não estruturais (aceitabilidade sensorial) Visíveis, <i>com efeitos</i> em elementos não estruturais Valores $\geq 40\%$ limites da Norma – estabilizados (Tabela 2.4, Capítulo 2) Flechas e deslocamentos excessivos – não estabilizados
Impermeabilização deficiente	2,0 3,0 4,0	Camada protetora danificada e/ou perda de elasticidade do material Pontos de infiltração, camada protetora degradada e/ou interrompida Degradação acentuada e perda relevante da estanqueidade
Infiltração de água na estrutura	1,0 2,0 3,0 4,0	Indícios de umidade superficiais Manchas superficiais por fissuras, ninhos, juntas, concreto poroso, etc. Grandes manchas na estrutura Infiltração generalizada
Infiltração de água na infraestrutura	2,0 3,0 4,0	Indícios de umidade na base de pilares e blocos de fundação Umidade acentuada, fissuras, deterioração do concreto na infraestrutura Infiltração generalizada
Lixiviação		Ver 'Eflorescência'
Manchas no concreto	2,0 3,0 4,0	Manchas de pouca extensão ($\leq 50\%$ da área visível do elemento) Manchas de grande extensão ($> 50\%$ da área visível) Manchas em todo o elemento
Obstrução de junta de movimento	2,0 3,0 4,0	Material da junta sem elasticidade, infiltrações Junta obstruída, fissuras paralelas em lajes, trincas em paredes Fissuras paralelas em lajes, estendendo-se a vigas e pilares
Reação álcali-agregado (RAA)		Ver <i>Desagregação por ataques químicos ao concreto</i>
Recalques de fundação	2,0 3,0 4,0	Indícios: início de fissuras na alvenaria com inclinação próxima a 45° Estabilizado, mas prejuízo à funcionalidade e fissuras na alvenaria Não estabilizado, com fissuras na alvenaria e peças estruturais
Sinais de (ou) esmagamento do concreto	3,0 4,0	Desintegração do concreto em pilares, ou aparelhos de apoio tipo gerber Desintegração acentuada, fissuras verticais ou bi-digonais em pilares, barras longitudinais expostas e indícios de sua flambagem
Vazamentos em reservatórios	2,0 3,0 4,0	Impermeabilização danificada, indícios de umidade em paredes e fundo Umidade significativa nas paredes e laje do fundo Generalizada

ANEXO II

(Metodologia GDE, Teatini e Nepomuceno, 2023, Editora UnB)

Tabela 4.2: Fissuras do concreto no estado plástico – Valores de F_p

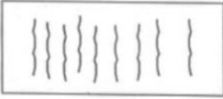
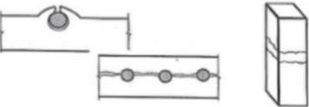
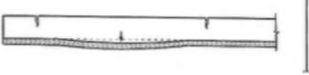
Fissuras	Descrição sucinta	Croquis	F_p
Retração plástica do concreto	- lajes, cortinas e paredes - fissuras superficiais e paralelas, em geral com distância máxima entre elas inferior a 1,0m		2
Assentamento do concreto	- alinhadas ou sobre as barras da armadura - pilares: abaixo dos estribos - interação com armaduras vizinhas		3
Movimentação de formas	- fixação e/ou posição incorreta de escoramentos e formas, ou sua resistência insuficiente		3

Tabela 4.3: Fissuras do concreto no estado endurecido e recalques – Valores de F_p

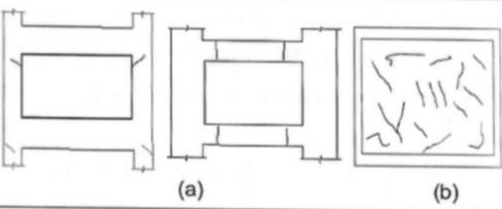

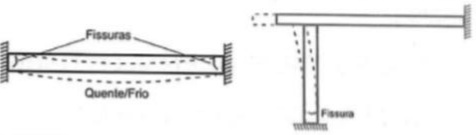
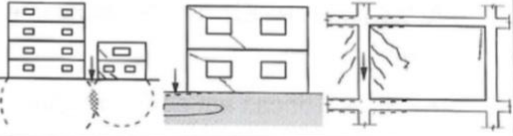

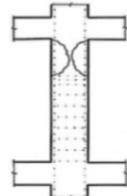
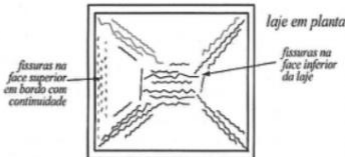


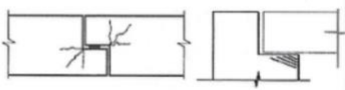
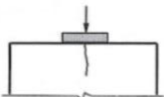
Fissuras	Descrição	Croquis	F_p
Retração por secagem (restrição de movimentos: juntas mal posicionadas, ou ausência)	- pilares e vigas com grandes diferenças de rigidez EI (a) - lajes e paredes: fissuras superficiais em aspecto "mosaico" – podem surgir em ambas as faces (b)		3
Lajes/paredes Fissuras com traçado em "mapa"	- excesso de desempenho de superfícies - aberturas e extensão reduzidas - danos só estéticos		2
Variações de temperatura	- perpendiculares ou pouco inclinadas em relação a eixos de elementos lineares com restrição de movimentos		3
Recalques de apoio	- fissuras inclinadas em alvenarias e estruturas, com direção, em geral, próxima a uma normal ao ponto de maior recalque		4

Tabela 4.4: Fissuras por erros de projeto, execução e cargas excessivas
 Valores de F_p – Vigas

Fissuras	Descrição	Croquis	F_p
Flexão: armadura bem ancorada	- fissuras normais ao eixo em trechos com momento fletor predominante e boa aderência aço-concreto		3
Flexão: ancoragem deficiente	- normais ao eixo em trechos com momento predominante e armadura com ancoragem deficiente		3
Flexão: má aderência na armadura	- normais ao eixo em trechos com momento predominante e armadura com perda de aderência		3
Flexão: ancoragem insuficiente	- fissuras nos extremos de barras com ancoragem insuficiente e emprego de ganchos		3
Flexão e força cortante	- fissuras inclinadas no trecho carga-apoio, ângulo cerca de 45° ao eixo, similar nas duas faces - podem entrar na zona comprimida e se dirigir aos apoios		4
Flexão, força cortante e torção	- fissuras com inclinações distintas nas duas laterais e menor abertura em uma das faces		4
Vigas altas: $h > 60cm$	- fissuras na nervura (alma) por ausência ou insuficiência de armaduras de pele (costelas)		3

Tabela 4.5: Fissuras por erros de projeto, execução e cargas excessivas
Valores de F_p – Pilares, lajes e apoios

Fissuras	Descrição	Croquis	F_p
Pilares: Flexo-tração predominante	- normais ao eixo na face tracionada e paralelas na comprimida: indício de esmagamento do concreto - mais próximas da extremidade de maior momento		4
Pilares: Compressão predominante	- fissuras paralelas ao eixo e/ou bi-digonais no centro: iminência de ruptura - espaçamento excessivo de estribos ou seu deslocamento		4
Lajes: Flexão: ruptura rígido-plástica	- na face inferior, fissuras saem dos cantos e ficam paralelas aos bordos no centro do vão - na face superior, fissuras paralelas aos bordos com continuidade.		4
Lajes: ruptura por punção	- fissuras com traçado circunferencial e/ou radial em torno do pilar		4
Lajes: momentos volventes em cantos livres	- cantos de lajes extremas, podendo surgir nas duas faces - influência de retração e variações de temperatura		3
Apoios tipo Gerber	- pontes e estruturas pré-moldadas - deficiência de movimento em aparelhos de apoio e/ou detalhamento inadequado		4
Apoio: carga concentrada em área reduzida	- apoios de pontes, estruturas pré-moldadas e apoios indiretos - armadura de fretagem deficiente ou mau detalhamento		3

ANEXO III

(Metodologia GDE, Teatini e Nepomuceno, 2023, Editora UnB)

METODOLOGIA GDE PARA ESTIMATIVA DOS GRAUS DE DANOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

Planilha 4.1: Elemento PILAR – Fatores de ponderação e de intensidade, Graus de dano

Nome do Elemento:				
Localização:				
Danos	F_p	F_i	D_i	Croquis/Observações
Carbonatação	3			
Cobrimento deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação do concreto	5			
Desvios de geometria	4			
Eflorescência/Lixiviação	4			
Falhas de concretagem	3			
Fissuração excessiva	2 a 5*			
Infiltração na infraestrutura	5			
Manchas no concreto	3			
Reação álcali-agregado (RAA) 5	5			
Recalques de fundação	5			
Sinais de esmagamento	5			
Resultado acumulado dos danos:	$G_{dc} =$			

* Consultar Item 4.4 – Fator de ponderação de danos: Figuras

Planilha 4.2: Elemento VIGA – Fatores de ponderação e de intensidade, Graus de dano

Nome do Elemento:				
Localização:				
Danos	F_p	F_i	D_i	Croquis/Observações
Carbonatação	3			
Cobrimento deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação do concreto	5			
Desvios de geometria	2			
Eflorescência/Lixiviação	3			
Falhas de concretagem	2			
Fissuração excessiva	2 a 5*			
Flechas excessivas	3			
Infiltração na estrutura	3			
Manchas no concreto	3			
Sinais de esmagamento	5			
Resultado acumulado dos danos:	$G_{dc} =$			

* Consultar Item 4.4 – Fator de ponderação de danos: Figuras