

Patologia de estruturas

*Fabrizio Longhi Bolina
Bernardo Fonseca Tutikian
Paulo Helene*

oficina de textos

Patologia de estruturas

Fabrizio Longhi Bolina

Bernardo Fonseca Tutikian

Paulo Roberto do Lago Helene

© Copyright 2019 Oficina de Textos

Grafia atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, em vigor no Brasil desde 2009.

CONSELHO EDITORIAL Arthur Pinto Chaves; Cylon Gonçalves da Silva; Doris C. C. K. Kowaltowski;
José Galizia Tundisi; Luis Enrique Sánchez; Paulo Helene;
Rosely Ferreira dos Santos; Teresa Gallotti Florenzano

CAPA E PROJETO GRÁFICO Malu Vallim
FOTO CAPA Ciclovía Tim Maia (Agência Brasil Fotografias)
PREPARAÇÃO DE FIGURAS Victor Azevedo
DIAGRAMAÇÃO Luciana Di Iorio
PREPARAÇÃO DE TEXTOS Natália Pinheiro Soares
REVISÃO DE TEXTOS Ana Paula Ribeiro
IMPRESSÃO E ACABAMENTO BMF gráfica

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Bolina, Fabrício Longhi
Patologia de estruturas / Fabrício Longhi Bolina,
Bernardo Fonseca Tutikian, Paulo Roberto do Lago
Helene. -- São Paulo : Oficina de Textos, 2019.

Bibliografia.
ISBN 978-85-7975-339-8

1. Concreto - Deterioração 2. Concreto -
Manutenção e reparos 3. Construção de concreto
4. Estruturas de concreto 5. Estruturas de concreto
armado I. Tutikian, Bernardo Fonseca. II. Helene,
Paulo Roberto do Lago. III. Título.

19-29900

COD-624.1834

Índices para catálogo sistemático:

1. Estruturas de concreto : Patologia : Engenharia
624.1834

Cibele Maria Dias - Bibliotecária - CRB-8/9427

Todos os direitos reservados à **Oficina de Textos**
Rua Cubatão, 798
CEP 04013-003 São Paulo Brasil
tel. (11) 3085-7933
www.ofitexto.com.br e-mail: atend@ofitexto.com.br

PREFÁCIO

Este livro é resultado de vários anos de discussões, troca de experiências, conversas e registros. É inegável que a área de Patologia das Construções carecia de um livro que viesse a orientar os profissionais quanto aos conceitos básicos dessa importante área de conhecimento, que discutisse o problema das estruturas de concreto armado e que abordasse, de modo inédito, as estruturas de aço e madeira. Como sabemos, algumas das manifestações patológicas podem ter origem no projeto, isto é, na concepção da estrutura. Todavia, muitas vezes o projeto não consegue antever as condições de exposição às quais a estrutura pode ser submetida, nem especificar os materiais adequados às condições do ambiente, nem mesmo compreender como a estrutura envelhecerá. Essa necessidade de equilíbrio e o desafio de integrar profissionais com diferentes experiências e atuações – seja na área de projeto ou de materiais – foram fundamentais para escrever este livro e tornaram-se a motivação principal do documento que apresentamos. Tentamos explorar ao máximo os mecanismos de dano que as estruturas podem sofrer.

Dividimos o livro em quatro capítulos:

- Cap. 1 – Patologia das construções;
- Cap. 2 – Patologia das estruturas de concreto;
- Cap. 3 – Patologia das estruturas metálicas;
- Cap. 4 – Patologia das estruturas de madeira.

No Cap. 1, apresentamos os conceitos para o estudo da Patologia das Construções, e nos demais capítulos abordamos as especificidades de dano, manifestação e recuperação de cada uma dessas estruturas. Estamos cientes de que o assunto não se esgota aqui, mas esse passo era necessário. Nossas edificações estão envelhecendo e precisamos capacitar estudantes, técnicos, engenheiros e arquitetos

(entre outros) para atuar, dentro de suas atribuições, nesse mercado. Consideramos que essa é a nossa pequena contribuição para um futuro próximo que certamente necessitará de profissionais aptos para reimplantar as condições mínimas de segurança e funcionalidade a essas estruturas.

Os autores

SUMÁRIO

1	PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES	7
1.1	Considerações iniciais	7
1.2	Conceitos e definições	22
1.3	Patologia das construções	30
1.4	Manutenção das edificações	53
2	PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO	61
2.1	Mecanismos de deterioração	65
2.2	Diagnóstico	167
2.3	Intervenção	179
3	PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS METÁLICAS	183
3.1	Mecanismos de deterioração	186
3.2	Diagnóstico	223
3.3	Intervenção	231
4	PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA	237
4.1	Origem da deterioração	241
4.2	Diagnóstico	264
4.3	Profilaxia	270
4.4	Terapia	282
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	309

As figuras com o símbolo  são apresentadas
em versão colorida entre as páginas 292 e 309.

1

PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES

1.1 Considerações iniciais

Patologia é a ciência que estuda a origem, os mecanismos, os sintomas e a natureza das doenças. O termo provém das palavras gregas *pathos* (sofrimento, doença) e *logia* (ciência, estudo), cujo significado é “estudo das doenças”. Assim, essa ciência pode ser compreendida como o estudo do desvio daquilo que é admitido como a condição normal ou esperada de algo, ou seja, uma anormalidade, que conflita com a integridade ou o comportamento habitual do elemento. Nesse estudo, estabelecem-se os termos e descrevem-se os processos de evolução, os mecanismos dos fenômenos deletérios e os sintomas de descaracterização do elemento, investigando e classificando as causas, origens e sintomas do dano ou da doença incidente sobre um corpo ou matéria. Para tanto, esse estudo apoia-se em inspeções ou exames para a compreensão e/ou remediação do defeito notado. Trata-se, portanto, de uma área do conhecimento que visa entender qual é a doença instalada, para que esta possa ser curada definitiva e corretamente.

O termo *patologia* é historicamente conhecido como sendo atrelado à ciência médica; todavia, há várias décadas, também tem sido empregado em outras áreas do conhecimento, como a de obras civis, sempre atrelado ao estudo das doenças e danos de algo ou alguém.

Dessa forma, a *patologia das construções* é a ciência que procura, de forma sistêmica, estudar os defeitos incidentes nos materiais construtivos, componentes e elementos ou na edificação como um todo, buscando diagnosticar as origens e compreender os mecanismos de deflagração e de evolução do processo patológico, além das suas formas de manifestação. Por outro lado, os problemas nem sempre são identificados de forma imediata e interpretados de modo legível e evidente. É necessário adotar, em alguns casos, processos e sequências de inspeções

estudo, não há o plural da palavra. Por exemplo, uma fissura é uma manifestação patológica, portanto, não pode ser referida como uma patologia.

Na patologia das construções, há diversos conceitos e termos empregados. Para introduzir o estudo, pode-se correlacionar a patologia das construções com a patologia na área médica, que é mais frequente no cotidiano, como exposto no Quadro 1.1. Além da descrição elementar dos termos, é possível compreender a severidade de cada dano nos exemplos.

Quadro 1.1 Termos gerais do estudo da patologia das construções e exemplos

Termos	Definição	Patologia das construções	Patologia médica
Manifestação patológica	São os problemas visíveis ou observáveis, indicativos de falhas do comportamento normal	Fissuras, trincas, manchamentos, deformações, mofo	Dor de cabeça, enjoo, tontura
Fenômeno	É a raiz do problema, na qual se deve focar para a solução	Corrosão, eflorescência, recalque	Câncer, depressão
Inspeção	É o <i>check-up</i> , quando o patólogo ou médico avalia o seu paciente, aprovando a condição ou solicitando novos exames ou ensaios	Avaliar a estrutura regularmente ou quando houver um fato extraordinário de interesse	Avaliar a pessoa para saber a condição atual de saúde
Anamnese	É o estudo dos antecedentes; nessa etapa, deve-se escutar dos usuários e pacientes o que estão sentindo	Conversa com síndico e moradores antigos, análise de projeto, verificação do estado dos prédios vizinhos	Análise de histórico do paciente e dos familiares, verificação de exames anteriores
Ensaio não destrutivos	São ensaios/exames que não danificam o paciente	Esclerometria, pacometria, ultrassom	Medição de pressão e febre, ultrassom
Ensaio semidestrutivos	São ensaios/exames que causam pequeno dano ao paciente	Extração de corpos de prova, <i>pull-out</i>	Biópsia, exame de sangue
Diagnóstico	É a explicitação e o esclarecimento das origens, mecanismo, sintomas e agentes causadores do fenômeno ou problema patológico	Corrosão, eflorescência, recalque	Câncer, depressão

base na NBR 14037: *manual de uso, operação e manutenção* (ABNT, 2014b). O manual deve ser entregue aos proprietários no ato da compra e/ou recebimento da unidade, ou então repassado, se porventura o bem for vendido ou alugado. O uso e a manutenção adequados ao longo da vida útil da edificação permitem que os requisitos de desempenho dos sistemas constituintes sejam preservados. Havendo a necessidade de reformas, a NBR 16280: *reforma em edificações – sistema de gestão de reformas* (ABNT, 2014c) define os parâmetros que devem ser atendidos nessa atividade, sobretudo atrelados à gestão do serviço, em que se discutem diretrizes e condições contratuais e de acompanhamento da atividade. A Fig. 1.5 correlaciona esse conjunto de normas.

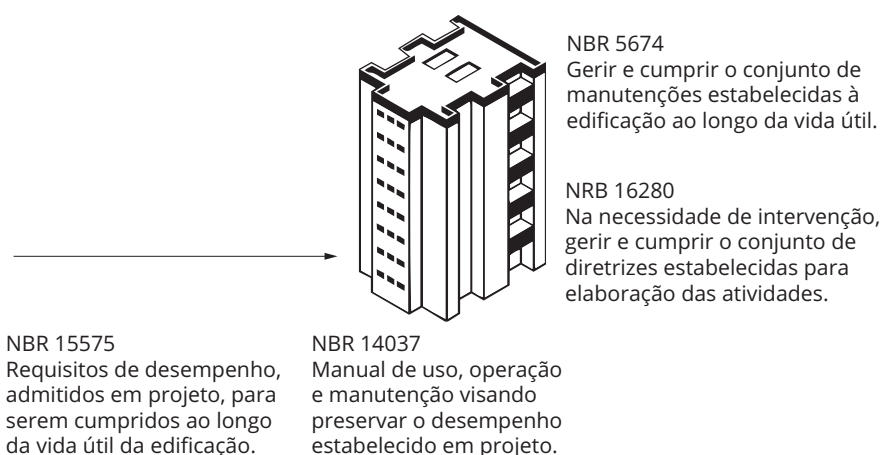


Fig. 1.5 Correlação entre normas usadas para implantar e preservar o desempenho da edificação

Souza e Ripper (1998) explicam que os problemas deflagrados durante o ciclo de vida da edificação podem ser diversos, causados tanto por envelhecimento natural dos materiais quanto por acidentes ocorridos durante o seu uso. Além disso, as ações dos profissionais e técnicos envolvidos na concepção podem induzir a formação de problemas, seja por falhas de projeto e execução, seja por escolha dos materiais empregados em obra. Isso reforça a necessidade de avaliar cada problema com precisão e prudência. Quanto maior a acuidade na avaliação de um processo patológico instalado, maior será a confiança do profissional na recomendação da medida corretiva e, portanto, no sucesso da intervenção.

Cabe ao *patólogo* essa tarefa. O *patólogo* é o profissional responsável por trabalhos técnicos que envolvem os estudos e as atividades para identificar, justificar, diagnosticar e prognosticar um problema patológico ou até mesmo realizar uma inspeção rotineira preventiva. No Brasil, a prática da atividade de *patólogo* é atribuição do arquiteto ou engenheiro civil, conforme Lei nº 5.194, de 24 de dezembro de 1966. Nesse cenário, cursos de pós-graduação em Patologia das Construções

a economia e sustentabilidade do setor, como destacam Medeiros, Andrade e Helene (2011). Observa-se que esses conceitos estão relacionados aos princípios de desempenho dos materiais e sistemas.

1.2.2 Visão sistêmica do desempenho das edificações

Desempenho, em termos gerais, é o comportamento em uso da edificação e dos seus sistemas. Conforme já evidenciado, as exigências temporais para cada edificação devem ser preservadas durante um determinado período de tempo. Cabe aos profissionais envolvidos na concepção da edificação e aos usuários que dela usufruem implantar medidas que visem preservar ou atingir essas exigências.

Incumbências

A vida útil de projeto (VUP) é uma definição teórica, e seu valor prático deve ser estabelecido na etapa de concepção da edificação. Esse período irá balizar todo o processo de elaboração da obra, bem como fundamentar o modo como a edificação será utilizada. Todos os envolvidos na edificação possuem a responsabilidade de edificar um bem que atenda a uma vida útil de, no mínimo, o tempo definido em projeto. Isso significa que o incorporador, o construtor, o projetista e o fornecedor devem entregar um bem durável, com materiais e métodos adequados, e cabe ao usuário seguir as medidas que lhe forem estabelecidas para garantir a funcionalidade da obra entregue. A Fig. 1.13 representa esse conjunto de incumbências aplicáveis na implantação de níveis de desempenho a uma edificação.

É de responsabilidade do incorporador, em consonância com os projetistas, definir o nível de desempenho almejado. Esse é o ponto de partida. Cabe também a ele identificar todos os riscos previsíveis na época do projeto, os quais poderão

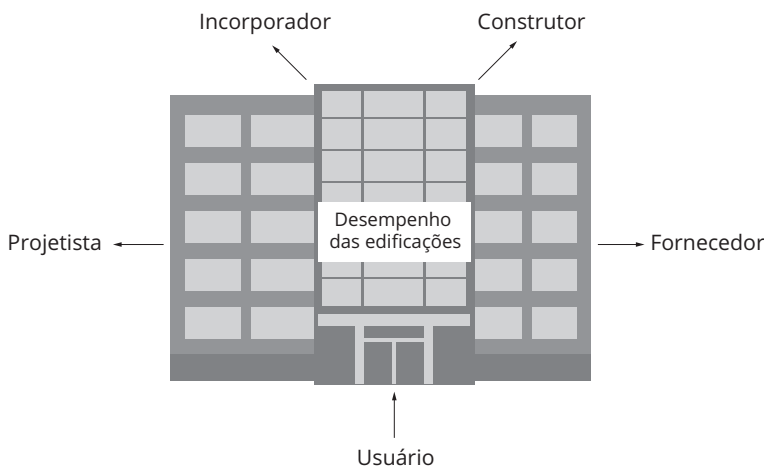


Fig. 1.13 Incumbências para a implantação do desempenho em edificações



Fig. 1.15 Microfissura em um sistema de revestimento em argamassa



Fig. 1.16 Fissura em um sistema de revestimento em argamassa



Fig. 1.17 Fissura ou trinca observada em um sistema de vedação vertical

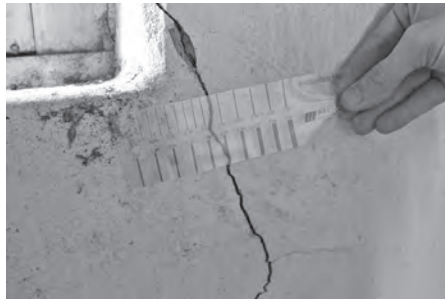


Fig. 1.18 Fissura ou rachadura próxima à abertura de uma edificação



Fig. 1.19 Fissuras produzidas no sistema de vedação vertical de uma construção

Analisados os sintomas e identificadas a existência de uma inconformidade e as suas prováveis causas, determina-se um plano de ação para o estudo e a compreensão mais minuciosa do problema. Traça-se, então, uma estratégia de

1.4.1 Tipos de manutenção

Manutenção corretiva

A manutenção corretiva é aquela intervenção que visa corrigir um elemento ou sistema no qual se observa a incidência de falha ou desempenho menor que o esperado. Busca-se realizar reparo ou substituição do elemento deficiente, com o objetivo de restabelecer a plena funcionalidade e segurança que lhe fora admitido em projeto.

Por não se tratar somente de uma manutenção de emergência, pode-se dividi-la em planejada e não planejada. A manutenção corretiva planejada é aquela decidida por meio da observação de uma queda do desempenho de algum elemento ou material, não necessariamente após a sua falha, e muitas vezes é definida após manutenções detectivas ou preditivas. Já a manutenção não planejada é aquela fundamentada na falha de algum elemento. A reconstituição do concreto de cobrimento das armaduras de uma estrutura que apresenta indícios de rompimento da sua película passivadora, identificados na manutenção preditiva, é um exemplo de uma manutenção corretiva planejada. Por outro lado, a substituição ou o tratamento das armaduras oxidadas de uma estrutura de concreto armado é um exemplo de uma manutenção corretiva não planejada.

Manutenção preventiva

A manutenção preventiva é a intervenção que visa preservar o desempenho da edificação em algum momento da sua vida útil, evitando a deflagração de anomalias. As intervenções ou manutenções preventivas não são realizadas quando se deflagra algum problema, mas em algum ponto que antecede o surgimento da falha, de forma a preveni-la. Consiste na substituição de peças ou na renovação dos sistemas de proteção, segundo uma periodicidade estabelecida pelo fabricante do produto. Um exemplo de aplicação desse tipo de manutenção é a renovação da pintura de uma edificação.

Manutenção preditiva

A manutenção preditiva é aquela que toma como base o acompanhamento dos parâmetros ou do desempenho de um elemento ou sistema que recebe monitoramento contínuo. Essa manutenção é elaborada de forma sistematizada, exigindo uma análise minuciosa dos resultados coletados ao longo do tempo para a tomada de decisão. É um tipo de manutenção mais fundamentado do que a preventiva, por envolver dados e índices comparativos. Para esse tipo de manutenção, os equipamentos e o sistema analisado devem permitir algum tipo de monitoramento, e as falhas devem ser oriundas de causas que também possam ser



PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

O concreto armado é a solução estrutural mais empregada nas construções brasileiras e em grande parcela das edificações dos principais países do mundo. A sua maior frequência de uso é justificada, principalmente, pelos reduzidos custos envolvidos na sua produção, devidos aos seus materiais constituintes, à mão de obra empregada na etapa de execução e ao tempo despendido de projeto, normalmente inferior ao das estruturas de aço. Com resistências adequadas, aliadas ao monolitismo das vinculações dos elementos, as estruturas de concreto armado permitem soluções mais ousadas do que aquelas concebidas em alvenaria autoportante. Além disso, a frequência de uso, aliada ao interesse em pesquisa do concreto, melhorou a sua compreensão por tecnólogos e projetistas estruturais, reduzindo as incertezas e otimizando seu emprego. Já em termos de durabilidade, a excelente resistência do concreto à água e à agressividade ambiental torna-o a solução estrutural geralmente com menor índice, periodicidade ou custo de manutenção em relação a outras, desde que adequadamente projetada ao ambiente de inserção.

Acreditava-se, antigamente, que o concreto armado era um material eterno, uma vez que apresentava um ótimo comportamento perante o uso e a exposição ao ambiente. Hoje, sabe-se que não é assim. Com o incremento de sua aplicação sobre diversos ambientes e/ou solicitações mecânicas, observou-se que, em certos momentos e sob certas condições específicas, alguns dos componentes que constituem o concreto armado passaram a apresentar mecanismos de deterioração típicos, promovendo uma redução parcial ou total de funcionalidade das peças e acarretando custos de reparo ou manutenção.

Percebeu-se que o concreto armado não era eterno, e que o ambiente o deteriorava de diferentes formas. No Brasil, somente no ano de 2003, com a publicação da nova NBR 6118 que substituiu a versão anterior de 1978 – norma que orienta

do, para cada ambiente, uma escala (níveis de intensidade), dividida em classes A1, A2, B1, B2, C e U. As classes não remetem diretamente a um ambiente, senão ao dano ao concreto. Pode-se ter, por exemplo, dois ambientes distintos, mas com o mesmo grau de severidade ao concreto, o que conduz a uma mesma classe. Essa severidade deve ser relacionada ao nível do dano produzido, e não ao tipo do dano. No Quadro 2.3 é possível notar a variabilidade da natureza dos ambientes de cada classe, a qual essa norma chama de “classificação da exposição”.

Quadro 2.3 Classes de agressividade ambiental segundo a AS 3600

Classe e nível	Descrição
A	1 Elementos em contato com o solo protegidos por tintas ou de fundação inseridos em solos não contaminados. Elementos em ambientes internos. Elementos em ambientes externos em regiões não industriais e de clima árido Ambiente: não faz referência sobre o grau de umidade
	2 Elementos em contato com o solo não contaminados não previstos em A1. Elementos em ambientes externos em regiões não industriais e de clima temperado Ambiente: não faz referência sobre o grau de umidade
B	1 Elementos em ambientes internos de construções em regiões industriais. Elementos em ambientes externos em regiões não industriais e de clima tropical e inseridos em regiões industriais em qualquer clima. Elementos inseridos em uma faixa compreendida entre 1 km e 50 km da costa do mar, em qualquer clima. Elementos submersos em água doce Ambiente: não faz referência sobre o grau de umidade. Em um caso, deixa subentendido
	2 Elementos inseridos em até 1 km da costa do mar, em qualquer clima, exceto em contato direto com respingos de maré e névoa salina. Elementos submersos em água salgada Ambiente: não faz referência sobre o grau de umidade. Em um caso, deixa subentendido
C	Elementos inseridos em zonas de respingo de maré e névoas salinas Ambiente: não faz referência sobre o grau de umidade, mas é possível pressupor
U	Elementos em contato com água corrente. Elementos em qualquer outro ambiente não admitido em A1, A2, B1 e B2 Ambiente: não faz referência sobre o grau de umidade, mas é possível pressupor

Fonte: adaptado de AS (2009).

A AS 3600 (AS, 2009) também propõe a separação do território australiano em zonas climáticas, conforme a Fig. 2.9, separando as regiões em clima tropical, árido ou temperado e estabelecendo recomendações de projeto específicas para



Fig. 2.26 Fissura e deslocamento do concreto na região dos estribos, junto à aresta de um pilar, na cidade de Mérida, México



Fig. 2.27 Estado avançado de corrosão das armaduras da face inferior de uma viga na região metropolitana de Porto Alegre, Brasil

uma fissuração. A armadura ajuda na absorção dos esforços; logo, quanto mais armada, menos a peça sofre com as ações.

Os mecanismos físicos também podem se desenvolver no estado fresco do concreto ou devido aos desgastes superficiais, no estado endurecido, originados por processos de atrito entre uma fonte externa e a superfície do concreto. Como consequência, são produzidas erosões e cavitações nos elementos.

A seguir, abordam-se os mecanismos de retração do concreto, movimentação térmica, ação de gelo e degelo e desgaste superficial por erosão ou cavitação.

Retração do concreto

A retração do concreto é dividida em retração por secagem, por assentamento plástico, autógena e por carbonatação.

A retração por assentamento plástico é quando o concreto se adensa e, após o endurecimento, elementos fixos e rígidos restringem a sua movimentação, como eletrodutos e barras de aço (Fig. 2.30).

Já a retração autógena ocorre devido ao volume dos compostos hidratados, o qual é menor que o volume do cimento mais o da água. Ou seja, toda partícula de cimento que hidrata provoca uma pequena contração na mistura. Logo, é uma manifestação patológica que ocorrerá, mais comumente, em concretos com elevados consumos de cimento, como os concretos de alta resistência.

A retração por carbonatação é parecida com a autógena, pois também é uma contração química. Ocorre quando o hidróxido de cálcio (CaOH_2) do concreto hidratado reage com o dióxido de carbono (CO_2) do ambiente, formando o carbonato de cálcio (CaCO_3). Porém, o CaCO_3 é menor do que o CaOH_2 , causando a retração do concreto. Assim, a retração por carbonatação ocorre ao longo da vida útil do elemento e predominantemente em ambientes mais agressivos e com concretos desprotegidos.

Observa-se que as retrações por assentamento plástico, autógena e por carbonatação não são comuns no dia a dia da construção civil nem resultam em

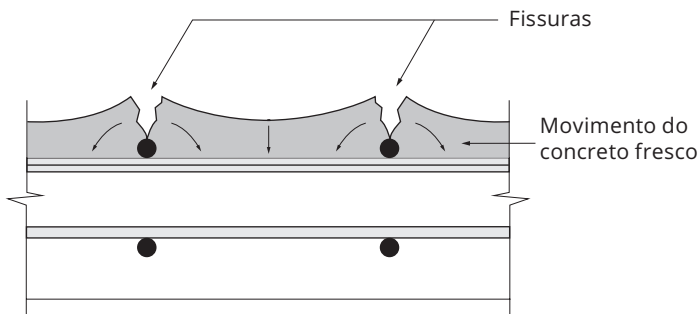


Fig. 2.30 Retração por assentamento plástico

Fonte: adaptado de Carmona Filho e Carmona (2013).

fissuras se formam quase que simultaneamente e em geral se localizam nos pontos onde estão instalados os estribos, conforme ilustra a Fig. 2.51.

Tração na flexão e cortante

No caso das vigas, o dimensionamento das peças é feito no estágio III de deformação proposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014a). Nesse estágio, para efeitos de otimização da seção, o momento fletor de projeto é aquele próximo ao da ruína do elemento, isto é, do seu estado-limite último (ELU). Como consequência, a peça encontra-se fissurada na região tracionada. Essas fissuras, todavia, são limita-

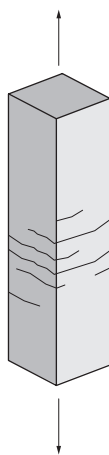


Fig. 2.51 Fissuras características de esforços de tração

das por norma, para efeitos de durabilidade. Cabe ao projetista verificar e evitar a fissuração excessiva das peças, por meio da verificação de deformações e aberturas máximas de fissuras ou do estado-limite de serviço (ELS). As fissuras nas estruturas de concreto são avaliadas durante o seu serviço e não nos instantes que antecedem o colapso.

As aberturas máximas de fissuras, analisadas no ELS-W (estado-limite de abertura de fissuras) pela NBR 6118 (ABNT, 2014a), são limitadas em função da agressividade química do ambiente onde a peça está inserida, de acordo com as classes de agressividade ambiental.

Independentemente da origem, as fissuras produzidas por esforços excessivos de flexão se manifestam com uma forma bem característica e ocorrem apenas na parte tracionada da seção. Toma-se como exemplo uma viga biapoiada com duas cargas concentradas de magnitude P , mostrada na Fig. 2.52.

Com o carregamento dessa viga, as trajetórias de tensão de tração e compressão que nela atuam são apresentadas na Fig. 2.53.

As tensões de tração são paralelas ao eixo longitudinal da viga no trecho em que a flexão pura ocorre, ou seja, no vão central dessa viga. Nos demais trechos, as trajetórias são inclinadas, devido à influência de outros esforços, como os cortantes. Nas extremidades da viga, as trajetórias são perpendiculares entre si, portanto as fissuras se desenvolverão perpendicularmente às direções das tensões de tração. Com base nessas linhas de tensão, Thomaz (2007) comenta que, no meio do vão, as fissuras tendem a ser perpendiculares ao eixo longitudinal da peça e, próximo aos apoios, essas fissuras se inclinam a aproximadamente 45° com a horizontal. Nas vigas altas, essas fissuras podem chegar a 60° de inclinação.

Deficiências nessa etapa podem promover uma redução do cobrimento nominal das armaduras, deixando-as mais suscetíveis aos ataques ambientais, como mostrado na Fig. 2.77, que representa uma vista inferior da viga de seção caixão que compõe o tabuleiro de uma ponte de concreto armado, com exposição de armaduras.

A remoção incorreta ou prematura dos escoramentos e formas pode induzir ao surgimento de fissuras por deformações plásticas excessivas. Nessa etapa, admite-se que o concreto, ainda em processo de cura, não possui uma resistência mecânica suficiente. Qualquer esforço pode culminar em manifestações patológicas, muitas vezes intangíveis. Por isso, destaca-se a necessidade de um projeto adequado de formas e de retirada dos escoramentos. A Fig. 2.78 ilustra possíveis problemas oriundos de inconformidades dessa natureza.

iii) Incêndio

As principais manifestações desenvolvidas nas estruturas de concreto armado expostas às altas temperaturas são a deterioração mecânica, a deformação térmica e o deslocamento (*spalling*). Esses fenômenos são fundamentados nas alterações físico-químicas na pasta de cimento e nos agregados e na incompatibilidade térmica entre ambos. Cada mecanismo se desenvolve em uma faixa específica de temperatura, representativa da natureza química do material, gerando alterações microestruturais variadas. Apesar de as altas temperaturas proporcionarem transformações de cunho químico e físico no concreto armado, a fonte geradora do processo, o fogo, não é um agente que o agride quimicamente,



Fig. 2.77 Vista inferior da viga caixão de ponte de concreto armado

Os equipamentos ou materiais empregados para o diagnóstico podem ou não produzir danos na estrutura. Dessa forma, os ensaios são classificados em *não destrutivos* ou *semidestrutivos*.

2.2.1 Ensaios não destrutivos

Os ensaios não destrutivos não danificam o elemento estudado; por isso, são os mais recomendáveis para serem especificados, sempre que possível. A seguir, detalham-se os principais, como fissurômetro, esclerometria, ultrassom, pacometria, resistividade elétrica, permeabilidade, termografia infravermelha e extensometria elétrica.

Fissurômetro

O fissurômetro é um instrumento que objetiva medir a magnitude da abertura da fissura de determinada peça. Além de estruturas de concreto armado, o instrumento também pode ser usado em revestimentos, alvenarias, entre outros. O uso do fissurômetro não indica a origem ou o mecanismo de deterioração que está instalado no concreto fissurado; todavia, ele serve como balizador da magnitude da manifestação que incide (Fig. 2.94). Pode ser usado junto com outros ensaios de maior precisão.



Fig. 2.94 Análise de fissura com fissurômetro

Medidas sucessivas da abertura das fissuras, em tempos predefinidos pelo profissional, podem indicar se o processo de deterioração instalado é ou não ativo. Esse fato pode informar se o mecanismo prossegue no tempo, o que ajuda na definição sobre a origem e a causa. Dificilmente as análises com fissurômetro são conclusivas, cabendo ao profissional realizar uma análise crítica das medições feitas.

PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS METÁLICAS

As vantagens das estruturas de aço, como velocidade e produtividade da obra, limpeza do canteiro de obras, precisão construtiva, aproveitamento dos espaços, alívio das fundações e redução dos resíduos finais de construção, ainda não sustentam, prioritariamente, o uso da solução de forma generalizada no Brasil. Para edificações convencionais, o custo agregado dessa alternativa, mediante alguns critérios de análise, pode ser alto – mas não necessariamente será sempre maior – em relação às estruturas de concreto armado, seja na etapa de produção (alto valor de equipamentos de montagem, operários qualificados etc.), no transporte dos perfis da usina siderúrgica ao canteiro ou pela própria matéria-prima. O uso dessa alternativa ainda deve ser considerado sob uma análise técnico-econômica e uma cultura menos imediatista em termos de resultados, o que pode, inclusive, torná-la mais barata do que o uso de estrutura de concreto armado.

Essa solução torna-se atrativa quando são considerados os benefícios agregados ao custo, principalmente quanto à agilidade, aos menores custos das fundações, à liberdade arquitetônica, entre outros. Nos períodos favoráveis da economia, a agilidade de produção torna-se prioritária. Além disso, os selos verdes das edificações, como LEED, Selo Casa Azul e Selo Aqua, ganham força e boa aceitabilidade do mercado, fazendo com que as estruturas metálicas tenham boas perspectivas no cenário da construção civil e sejam avaliadas como solução estrutural para edificações habitacionais convencionais, como já ocorre nos Estados Unidos e na Inglaterra.

Os sistemas estruturais compostos por perfis de aço estão susceptíveis a agressões do ambiente de construção da estrutura, o que compromete o seu desempenho no tempo. Mecanismos físicos, químicos e biológicos podem se desenvolver no aço, sendo a corrosão metálica a mais conhecida, pois esse fenômeno é muito frequente nessas estruturas. As recomendações de durabilidade

esses mecanismos se desenvolvem ao longo do tempo. Em síntese, analisa-se a essência do problema, ou seja, a “doença”, a qual pode ser de cunho químico, físico, biológico ou mecânico. No segundo tópico, no qual se debate o *diagnóstico*, é apresentada a gama de equipamentos e de ensaios necessários para identificar a anomalia. Nesse tópico, realiza-se desde o levantamento de dados até a interpretação dos problemas, sendo apresentados os “exames”. No terceiro tópico, em que se discute o *reparo*, são apresentadas algumas formas de correção dos problemas diagnosticados, ou seja, as recomendações para sanar o problema.

3.1 Mecanismos de deterioração

Os mecanismos encontram-se separados em químicos, físicos, biológicos e mecânicos.

3.1.1 Mecanismos químicos de deterioração

O principal e mais frequente mecanismo químico de deterioração das estruturas de aço é a corrosão metálica. A corrosão é definida como um processo espontâneo, provocada pela interação química do metal com o ambiente, promovendo variações químicas das suas propriedades, com perda das características estruturais. Pode-se caracterizar esse mecanismo como um processo de deterioração físico-químico, uma vez que os produtos da corrosão causam uma alteração da geometria das peças metálicas, devido à dissolução dos metais por reações químicas (via seca, por meio de gases) ou eletroquímicas (via úmida, por meio de eletrólitos).

Para os materiais da construção civil, a corrosão eletroquímica é a mais frequente, representando, segundo Raichev, Veleva e Valdez (2009), 93% dos casos. A ocorrência do fenômeno também é relacionada ao carregamento que incide na peça, o estado de tensão, o qual gera deformações que podem tornar o material mais susceptível na região tensionada. Ademais, fatores climáticos, como temperatura e umidade, justificam o desencadeamento do fenômeno, fazendo com que seja observado de forma holística.

O mecanismo de corrosão é um fenômeno intrínseco aos metais. A corrosão química desenvolve-se, inclusive, na indústria siderúrgica, durante a fabricação, devido às altas temperaturas. De acordo com Raichev, Veleva e Valdez (2009), no decorrer do processo de laminação a quente de metais ferrosos, em torno de 3% a 5% do metal tratado é perdido. Trata-se da corrosão de superfície que ocorre nos elementos já nas primeiras idades após a produção.

Gentil (2012) comenta que a deterioração causada pela reação físico-química entre material e ambiente submete-o a processos de desgaste, variações químicas da sua composição ou modificações de cunho estrutural, tornando-o inadequado para uso. O fenômeno promove uma transformação degenerativa

Formas de corrosão (sintomatologia)

A corrosão metálica pode ser uniforme, localizada (ou não uniforme) e galvânica.

i) Corrosão uniforme

Tem-se a corrosão uniforme quando o mecanismo da corrosão se desenvolve em toda a superfície do elemento estrutural, ocorrendo de forma contínua, com taxa aproximadamente igual em cada ponto da peça. É uma corrosão facilmente detectada, dada a sua visibilidade em toda a extensão do elemento. A corrosão uniforme geralmente se desenvolve nos metais em contato direto com a atmosfera, pelo fato de o metal ser submetido a uma frente de ataque que é igualmente uniforme. A corrosão produzida por ácidos em peças submersas também pode produzir esse tipo de manifestação.

Na Fig. 3.5 são apresentadas peças com corrosão uniforme.

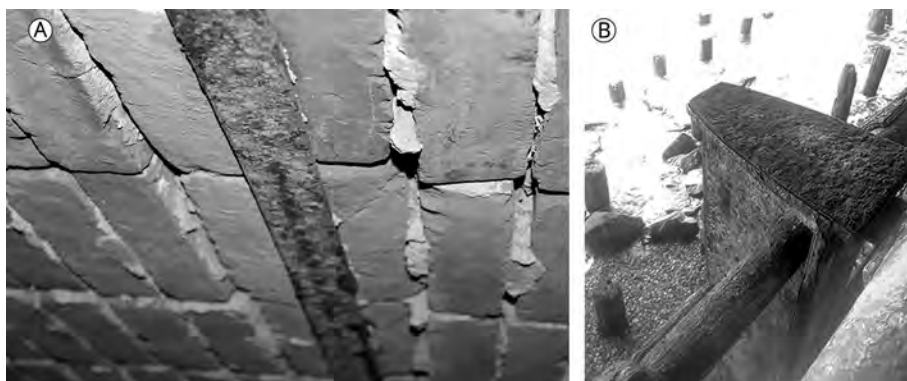


Fig. 3.5 Corrosão uniforme em (A) viga metálica de casa histórica e (B) guarda-corpo

No primeiro caso, a viga constitui a laje superior do reservatório de água de uma edificação da década de 1920, em uma cidade histórica do interior do estado do Rio Grande do Sul, no Brasil. Deduz-se que as peças foram submetidas a uma umidade intensa e uniforme durante seu uso, o que, dada a inexistência do uso de tintas de proteção na época, promoveu deterioração contínua. No segundo caso, mostra-se o guarda-corpo inserido em uma região costeira, às margens do rio East, nos Estados Unidos, sendo submetido ao mesmo processo de corrosão, dada a uniformidade da agressão do ambiente que o entorna. Essa é a corrosão típica do aço-carbono e do aço patinável.

ii) Corrosão localizada ou não uniforme

A corrosão localizada ou não uniforme desenvolve-se de forma pontual: manifesta-se em pontos de corrosão com geometrias variadas, profundidades distintas

3.1.4 Mecanismos mecânicos de deterioração

Os mecanismos mecânicos de deterioração são aqueles que se desenvolvem externamente ao material, ou seja, é uma ação externa à estrutura.

Sobrecargas

Carregamentos excessivos não previstos e devidos a alterações do uso da edificação provocam tensões não previstas em projeto que, caso ultrapassada a resistência admissível dos elementos, deflagram manifestações patológicas de sobrecarga. O projetista, nesse caso, não possui responsabilidade sobre as consequências que incidem na estrutura, como deformações excessivas ou, em última instância, colapso parcial ou total. Persy (2008) destaca a sobreposição das consequências sobre construções em estruturas de aço com idades avançadas. Aços “velhos” não soldados, geralmente, são sensíveis aos choques e apresentam rupturas bruscas, devido à não ocorrência de deformações plásticas do material, conforme Fig. 3.17.

No caso das sobrecargas, a ruptura de peças em aço não ocorre de forma brusca. Geralmente há alguma deformação – às vezes excessiva – antes de o colapso ocorrer, salvo o sistema de ligação. Nas ligações metálicas, as deformações geralmente são pequenas, pois normalmente são formadas por peças também pequenas em relação às dimensões dos elementos estruturais (pilares, vigas etc.). Assim, na existência de sobrecargas não previstas, essas deformações tornam-se pouco perceptíveis “a olho nu” ou ao uso da edificação. Caso essa sobrecarga siga ocor-

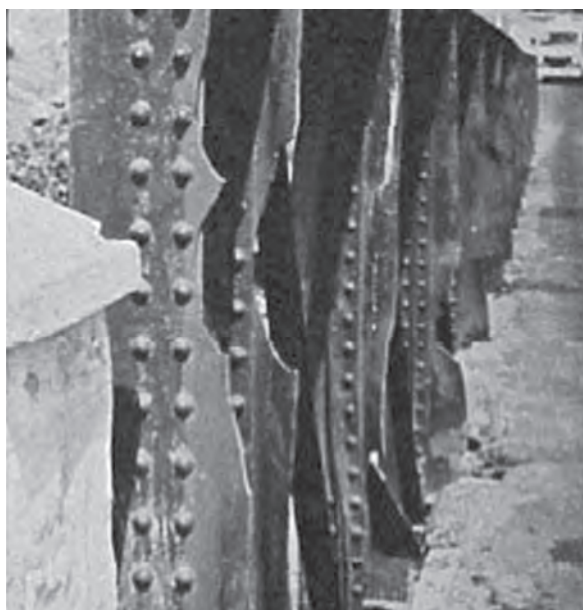


Fig. 3.17 Fragilidade ao choque de uma estrutura metálica datada do ano de 1920
Fonte: Persy (2008).

PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA

A madeira é um material de grande utilidade para o setor da construção civil, e é frequentemente empregada em diversas situações, desde como material de acabamento nos sistemas de vedação até em um elemento estrutural. Contudo, como qualquer outro material da construção civil, a madeira está propensa à deterioração por agentes externos. Por ser um material orgânico, a madeira possui certas particularidades quanto aos mecanismos de deterioração, apresentando manifestações patológicas bem específicas.

No passado, pela grande frequência de utilização, aliada à falta de manutenção, muitas obras com madeira apresentavam manifestações patológicas de intensidades significativas, às vezes em um curto espaço de tempo. Esse fato criou uma percepção de que a madeira não é um material duradouro, tampouco adequado para ser usado como solução para um sistema estrutural.

Utilizada desde os primórdios da humanidade, acompanhando a sua história, a madeira foi um dos primeiros materiais da construção empregados como solução estrutural. Com o avanço do setor da construção civil, passou-se a conhecer mais sobre seu comportamento, e novos critérios de projeto, até então desconhecidos, passaram a ter papel decisivo na concepção das estruturas, como a durabilidade.

A previsão dos fatores e agentes potencialmente agressivos ao material é determinante na predição da vida útil das estruturas, evidenciando-se a necessidade de se adotarem medidas preventivas conforme o ambiente em que o elemento estará inserido. Nesse contexto, similarmente às normas brasileiras de projeto de estruturas de concreto armado, o Eurocode 5 (EN, 2004) define classes de serviço para as estruturas de madeira, em função da agressividade ambiental, o que não ocorre na NBR 7190 (ABNT, 1997). A norma nacional apresenta critérios superficiais quanto à durabilidade, às vezes apenas implícitos em coeficientes do

às folhas. Já o cerne, ou durâmen, é composto por células mortas ou inativas, que possuem a coloração mais escura e “seca”; sua função é sustentar o tronco. A umidade dessa região é menor do que a do alburno, o que justifica algumas manifestações patológicas apresentadas neste capítulo. Por fim, a medula é uma parcela que se localiza no eixo do tronco e representa o primeiro crescimento da árvore. Com o crescimento da madeira, formam-se anéis em volta da medula, sendo possível identificar a idade da árvore por meio da contagem deles.

A madeira é formada por celulose, hemicelulose e lignina. Segundo Carvalho (2015), no caso da molécula de celulose, os grupos de hidroxila (-OH) que a constituem são os grandes responsáveis pela adsorção das moléculas de água, fato que acaba enfraquecendo as cadeias e refletindo negativamente na capacidade resistente das peças. Por isso que as normas de projeto de estruturas de madeira levam em consideração a umidade, propondo uma correção das resistências com base nessa variável e no controle no tempo.

4.1 Origem da deterioração

Nesta seção, explanam-se as origens das manifestações patológicas em estruturas de madeira, os principais mecanismos e os respectivos agentes que deflagram a deterioração do material, evidenciando as principais anomalias dos elementos. Como já referenciado, os agentes que degradam a madeira são de cunho biológico, atmosférico, químico, ou aparecem como consequência do incêndio.

4.1.1 Agentes biológicos

Os agentes biológicos são os mais corriqueiros agentes causadores de deterioração das madeiras. Os principais agentes biológicos agressores dessas estruturas são (I) os fungos xilófagos e (II) os insetos xilófagos. Chamam-se xilófagos todos aqueles fungos e insetos que se alimentam de madeira. O mecanismo de ataque desses seres se deflagra, essencialmente, em via úmida, sendo imprescindível a presença de umidade e a efetiva condição da madeira de retê-la. Segundo Negrão e Faria (2009), alguns poucos agentes agridem a madeira seca, destacando-se, por ora, as térmitas de madeira – e o mais comum é o cupim – e alguns tipos de carunchos. As principais consequências desse ataque são a redução da seção transversal da madeira, promovendo alteração física, e a perda da capacidade resistente, culminando em alteração mecânica.

Vale destacar, conforme Cruz (2001), que os problemas causados pelos agentes biológicos se deflagram segundo circunstâncias distintas. Enquanto uma infestação por caruncho afeta a estrutura de forma generalizada, a agressão por cupins deteriora a madeira de modo pontual, sobretudo em zonas de intensa umidade e baixa insolação.

b) Térmitas de madeira seca

Para o seu desenvolvimento, diferentemente das térmitas subterrâneas, as térmitas de madeira seca necessitam de uma umidade da ordem de 15%, ou seja, a umidade natural do ar já lhes é suficiente. As colônias geralmente são compostas por cerca de 100 a 250 indivíduos. Eles ingressam por via aérea na madeira, e têm como característica principal perfurações de entrada muito reduzidas, quase invisíveis a olho nu, sendo muito difícil localizar os seus ninhos.



Fig. 4.13 *Aspecto laminado da madeira com presença de restos de terra nos canais*

Fonte: A-1 Pest Control (s.d.).

Pelo fato de os insetos buscarem proteção contra predadores, as galerias estão sempre escondidas, não sendo acessíveis pela superfície externa da peça de madeira, desenvolvendo-se no interior da peça, preferencialmente no alburno. Na inspeção, um som com percussão oca pode identificar a existência de galerias internas e, portanto, de uma contaminação da madeira. Ademais, sinais externos de infestação consistem, na maioria das vezes, de pequenas pelotas fecais, da ordem de 1 mm a 2 mm de diâmetro, na superfície do elemento.

As Figs. 4.15 e 4.16 mostram o estado de deterioração de uma seção de madeira serrada e atacada por térmitas de madeira seca. Somente com a serragem da madeira foi possível identificar o estado ou grau de deterioração e a perda de seção que esses insetos promoveram. Assim, muitas vezes se torna mais interessante substituir a peça do que inspecioná-la, visto que a recomposição dos elementos serrados compromete a estética da estrutura.



Fig. 4.14 *Profundidade de ataque por térmita em uma madeira*

Fonte: Chris Baranski (CC BY 2.0, <https://flic.kr/p/9EqzDU>).

ii) Carunchos

Os carunchos são insetos que, diferentemente das térmitas, se desenvolvem por larvas. Diz-se, portanto, que se trata de um inseto com ciclo biológico variado, visto que ele sofre diversas mutações ao longo de sua

Portanto, evidencia-se que o controle do teor da umidade natural da madeira é fundamental para garantir a sua estanqueidade e proporcionar o seu uso adequado, evitando defeitos como empenamentos, arqueações, torções, entre outros. Esses mecanismos estão diretamente relacionados à resistência da madeira e à sua susceptibilidade ao ataque por fungos. As alterações de geometria da madeira por variações higroscópicas são um fenômeno irreversível, não havendo medidas corretivas para recuperar o elemento.

As variações geométricas tipicamente observadas estão ilustradas na Fig. 4.23 e dependem, basicamente, da diferença de velocidade de secagem entre faces, do mecanismo de evaporação d'água, do revestimento diferente entre faces, da porosidade e da permeabilidade da madeira. A variação geométrica apresentada pode ser por (I) encanoamento, (II) arqueamento, (III) torcimento (torção) ou (IV) fissuração.

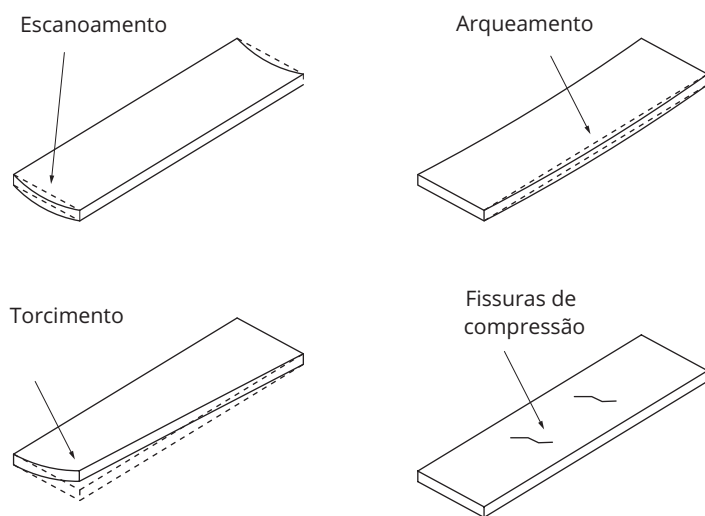


Fig. 4.23 Variações geométricas observadas em madeiras
Fonte: adaptado de Gerola (2011).

Dada a magnitude em que essas variações geométricas se apresentam, microfissuras ou fissuras superficiais podem se deflagrar na superfície das peças. A justificativa está associada aos ciclos de inchamentos e contrações, pela variação de umidade natural do elemento.

Na secagem, rachaduras superficiais podem aparecer por secagem brusca e não uniforme do material ainda úmido, com a superfície da madeira perdendo umidade mais rápido do que o seu interior. As camadas internas impedirão que as externas sofram retração, o que gera tensões que excedem a resistência da

à proteção via tratamento contra a ação do ambiente. As medidas apresentadas na sequência são recomendações de projeto. Sua implantação pode mitigar a susceptibilidade da madeira a anomalias que comprometam a sua vida útil e o seu desempenho.

4.3.1 Detalhes de projeto

Os detalhes de projeto podem ser divididos em (I) ligações entre viga e pilar ou entre viga e viga, (II) encontro da base do pilar com o terreno e (III) cargas suspensas.

Ligações entre elementos

Conforme já discutido, a madeira é um material filamentosos. Além de indicar o sentido da maior resistência da madeira, as fibras auxiliam a compreender como as manifestações patológicas podem se desenvolver segundo medidas específicas de projeto adotadas.

Um dos principais pontos a ser discutido é o engaste das peças estruturais de madeira, principalmente porque é difícil promover um engastamento perfeito entre os elementos, visto que deformações residuais ocorrerão entre peças conectadas. Essas deformações provêm do deslocamento relativo das chapas metálicas da ligação, dos parafusos ou pregos, da folga relativa entre o furo e o elemento de conexão, entre outros. Desse modo, admitir a existência de engaste perfeito no projeto estrutural pode se tornar arriscado. A consequência, no caso de vigas, é a atuação de momentos positivos superiores ao calculado, o que ocasiona um coeficiente de segurança inferior ao requerido por norma, podendo causar até mesmo o colapso do sistema estrutural.

O segundo ponto a ser discutido no engaste é a questão do detalhamento. A Fig. 4.37 mostra duas situações de projeto da ligação de viga com pilar de madeira. Na Fig. 4.37A, empregou-se uma chapa de ligação na base inferior da viga, fato que promoveu um comportamento muito próximo ao de uma rótula perfeita. Já na

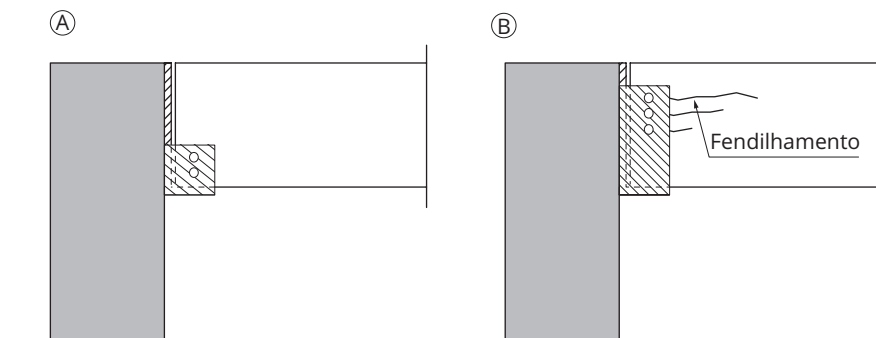


Fig. 4.37 Ligação (A) rotulada e (B) engastada, gerando fendilhamento

Fig. 2.12 Prédio FAU/ USP, com manifestações típicas de ataque por chuva ácida
Fonte: Santos (2011).



Fig. 2.14 Pilares com lixiviação curados com vapor quente em obra na cidade de Sapucaia do Sul (RS)

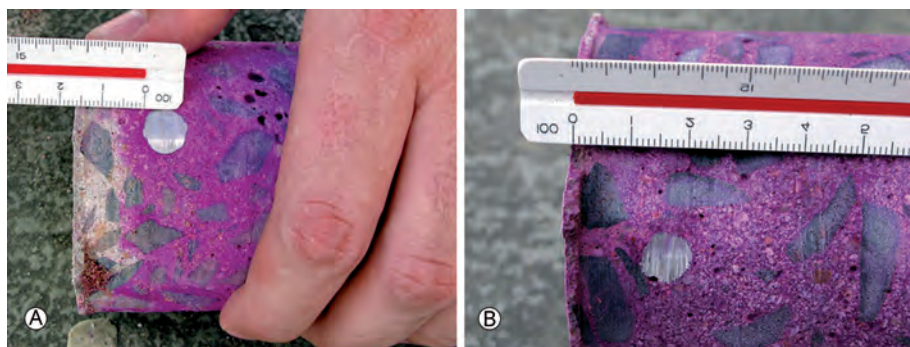


Fig. 2.28 Concreto da camada de cobertura (A) carbonatado e (B) não carbonatado



Fig. 4.19 *Perfurações na superfície de madeira, típicas de um ataque por carunchos*
 Fonte: Moreira (2009).



Fig. 4.21 *Formação de espécie vegetal em viga de madeira*



Fig. 4.22 *Fissuras longitudinais no eixo da madeira, no sentido das fibras*