



## Recuperação e Reforço de Estrutura de Concreto Armado Submetida à Ação de Incêndio

### *Recovery and Reinforcement of Reinforced Concrete Structure Subjected to Fire Action*

TONON, Matheus Bellotti de Souza<sup>1</sup>; SANTOS, Amaro Francisco Codá dos<sup>2</sup>  
 matheusbtonon@yahoo.com.br<sup>1</sup>; coda.engenharia@uol.com.br<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Pós-graduando em Planejamento, Gestão e Controle de Obras Civis, NPPG/Poli – UFRJ

<sup>2</sup> Dsc. Engenharia Civil, Professor no Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ

#### Informações do Artigo

Palavras-chave:

*Recuperação Estrutural.  
 Reforço Estrutural.  
 Concreto Armado.*

Key word:

*Structural Recovery  
 Structural Reinforcement  
 Reinforced Concrete*

#### Resumo:

*As estruturas de concreto armado apresentam uma vida útil e, diante disso, surge a necessidade de desenvolver técnicas de reabilitação das mesmas. A recuperação e o reforço estrutural abrangem diversos casos: estruturas que não estão mais em condições suficientes de suportar o carregamento atuante; que foram projetadas ou executadas erroneamente em desacordo com o projeto ou ainda as submetidas a fatores adversos, como os incêndios. Uma edificação pública localizada no estado do Rio de Janeiro, objeto deste artigo, foi parcialmente afetada pela ação do fogo. Nesse sentido, uma avaliação técnica deve subordinar-se a um duplo enfoque: análise do ponto de vista dos materiais e dos aspectos estáticos anômalos, a fim de assegurar a ordem estrutural. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é analisar os danos estruturais causados à edificação pela ação do incêndio com base no levantamento de todos os problemas identificados pelo exame visual das peças portantes e nos resultados de inspeção. Face à constatação do estado remanescente da estrutura, busca-se explanar as intervenções de reforço e recuperação adotadas ao pleno restabelecimento das suas condições de utilização e analisar o processo executivo da obra, atestando os aspectos em conformidade com o projeto.*

#### Abstract

*Reinforced concrete structures have a lifespan, and therefore, the need arises to develop rehabilitation techniques for them. Structural recovery and reinforcement encompass various cases: structures that are no longer in sufficient condition to support the acting load; that were designed or executed incorrectly in disagreement with the project; or that were subjected to adverse factors, such as fires. A public building located in the state of Rio de Janeiro, the subject of this article, was partially affected by fire. In this sense, a technical evaluation must be subordinated to a dual approach: analysis from the perspective of materials and anomalous static aspects, in order to ensure structural order. Thus, the objective of this work is to analyze the structural damage caused to the building by the fire action based on the survey of all problems identified by the visual examination of the load-bearing elements and inspection results. Given the remaining state of the structure, the aim is to explain the reinforcement and recovery*

*interventions adopted for the full restoration of its usability conditions and to analyze the executive process of the work, attesting to the aspects in accordance with the project.*

## 1. Introdução

A identificação dos problemas causados à estrutura mediante um diagnóstico preciso qualifica-se como uma ferramenta indispensável à adoção de medidas terapêuticas de correção. Em se tratando de ações por variação de temperatura enquanto agentes indutores de danos à construção, deve-se avaliar que a exposição dos elementos estruturais a elevadas temperaturas exige adequada análise para verificação do seu estado remanescente de conservação. No âmbito da engenharia estrutural, pode-se indicar a tendência de deformação dos vínculos em virtude da dilatação das peças.

Uma edificação pública localizada no estado do Rio de Janeiro foi parcialmente afetada por um incêndio, causando prejuízo aos elementos portantes. Observaram-se casos menos graves como os deslocamentos em bordos dos elementos estruturais e quadros pouco intensos de fissuração. Entretanto, identificaram-se severas anomalias em lajes, especialmente por sua posição de maior exposição. Diante disso, houve a necessidade de comprovação da adequabilidade da estrutura à utilização definitiva bem como a indicação de medidas de reabilitação estrutural – contemplando as soluções mais convenientes aos tipos de danos sofridos e considerando, ainda, os aspectos de exequibilidade.

Ressalta-se a importância de não se atribuir a gênese dos quadros patológicos exclusivamente à intensa ação do fogo, mas também de se considerar origens de falhas humanas durante: o projeto, a construção (pela execução inadequada e pelo uso incorreto de materiais) e a utilização (por ausência de manutenção, alterações na estrutura ou sobrecargas).

Neste artigo, serão abordados conceitos iniciais acerca dos temas “patologia das

construções” e “recuperação e reforço estrutural” baseados em pesquisa bibliográfica descritiva e revisão de literaturas. Ao final, será apresentado o estudo de caso.

## 2. Patologia das estruturas de concreto armado

A patologia das construções é a parte da engenharia que estuda os sintomas, os mecanismos, as causas e as origens dos defeitos das construções civis, ou seja, é o estudo das partes que compõem o diagnóstico do problema, segundo Helene [1].

O surgimento de manifestações patológicas configura um aviso por parte da estrutura da existência de falhas, isto é, um indicativo de não conformidade em alguma etapa da construção. Dessa forma, aponta-se uma deficiência no controle de qualidade de alguma atividade, dentre as seguintes possibilidades: concepção e projeto, materiais, execução, utilização e fatores adversos. A fase de concepção do projeto, no entanto, é responsável pelo maior percentual (aproximadamente 40%) de causas dos problemas patológicos em estruturas de concreto [1].

O olhar moderno das obras de engenharia civil deve, portanto, considerar não apenas a garantia de uma construção sólida, resistente e de qualidade, mas proporcionar a continuidade de um desempenho satisfatório através de uma manutenção adequada, eficiente e apropriada ao tipo de estrutura.

### 2.1 Ação do fogo em estruturas

As estruturas de concreto armado submetidas a incêndios são, geralmente, expostas a elevadas temperaturas, com condições variáveis de localização, calor, duração e exposição. Tal conjuntura exige uma avaliação técnica que se subordina a um

duplo enfoque: análise do ponto de vista dos materiais (o concreto e seus elementos constituintes e o aço) quanto aos danos das possíveis alterações das propriedades mecânicas; e sob os aspectos estáticos anômalos do funcionamento de uma estrutura com a verificação estrutural da parte remanescente da obra, em condições de aproveitamento à utilização prevista, considerando a capacidade resistente residual dos elementos portantes e as propriedades mecânicas remanescentes dos materiais.

O concreto possui boa resistência ao fogo, excluindo casos excepcionais de incêndio, em decorrência de suas propriedades térmicas em meios contínuos (reduzida qualidade na transmissão de calor comparada a meios isolados). Quando sujeito a altas temperaturas, apresenta alterações das suas propriedades mecânicas em função dos efeitos nocivos produzidos pelo calor contra a constituição física e química de seus elementos e, consecutivamente, da sua resistência. Quando resfriado, pode não recuperar parte significativa de suas propriedades originais [2].

Com relação ao aço convencional, isoladamente, suas propriedades mecânicas degeneram-se consideravelmente em altas temperaturas. As mudanças são processadas, de um modo geral, com perda de resistência a partir de 400°C [2].

Desde que a temperatura máxima atingida não resulte na deformação final do material ou que o tempo de exposição ao calor não seja demasiadamente prolongado, o aço recupera, quase integralmente, todas as suas propriedades mecânicas após o seu resfriamento, como fosse um tratamento térmico de recozimento do mesmo. Por fim, o aço está irreversivelmente comprometido ao uso se a temperatura for levada próxima a sua fusão, resultando na alteração na estrutura interna dos grãos, podendo alcançar uma ruptura frágil [3].

## 2.2 Processos de deterioração

As estruturas de concreto armado, face aos efeitos anormais, reagem de diversas

formas, indicando sinais externos que possibilitam conhecer a enfermidade que as afetam. Dessa forma, cabe à sintomatologia o estudo dos fenômenos de manifestações das doenças que, por sua vez, acusa as diferentes causas possíveis. Dentre os principais processos físicos de deterioração, podem ser citados: fissuração, desagregação, carbonatação, perda de aderência e desgaste do concreto [4].

As fissuras são consideravelmente os indícios mais frequentes e classificam-se em dois tipos: ativas (quando o responsável pela sua geração ainda atua) ou inativas (quando estabilizadas e os efeitos tiverem deixado de existir). Sua caracterização como uma deficiência estrutural está diretamente relacionada à origem, à intensidade e à magnitude das circunstâncias apresentadas, uma vez que o concreto fissura naturalmente sempre que as tensões trativas ultrapassarem a resistência última à tração (na ordem de 10% da resistência à compressão do concreto). Além disso, os quadros de fissuração são originados por fatores como: deficiências de projeto, contração plástica, assentamento do concreto, perda de aderência, movimentação de escoramentos ou formas, retração, deficiências de execução, reações expansivas, corrosão das armaduras, recalques diferenciais, variação de temperatura e ações aplicadas [5].

## 2.3 Diagnóstico

O diagnóstico consiste na vistoria minuciosa e no planejamento para determinação da real condição de uma estrutura a fim de averiguar as anomalias atuantes, as causas, as providências e os métodos de tratamento. Deve ser precedido por levantamento de dados bem definidos e análise adequada, pois pode haver conclusões diversas em virtude de uma série de fatores; em especial, o custo-benefício [1].

## 3. Técnicas de reparo, recuperação e reforço de estruturas de concreto

Após o diagnóstico adequado da situação de uma estrutura, devem-se adotar medidas de

intervenção baseadas, sobretudo, em critérios técnicos, respeitadas as questões econômicas, os aspectos de segurança e a garantia da qualidade dos serviços. Para tanto, alguns conceitos precisam ser entendidos.

O reparo consiste na correção localizada de problemas patológicos. O reforço implica a correção de tais problemas com aumento da resistência ou da capacidade portante da estrutura, ao passo que a recuperação estrutural visa restituir – integral ou parcialmente – o desempenho original dos elementos para o qual foram projetados. Já a reabilitação (ou intervenção) abrange tanto o reparo simples como a recuperação e o reforço. Por isso, pode ser vista como uma ação necessária para qualificar a estrutura a cumprir novamente sua função original ou a atender novas condições de uso diferentes daquelas previstas inicialmente em fase de concepção [6].

### **3.1 Preparo do substrato e limpeza das superfícies**

O preparo do substrato pode ser definido como o conjunto de tratamentos prévios das superfícies das peças estruturais. Já a limpeza compreende os procedimentos realizados imediatamente antes da aplicação dos materiais de recuperação. Os mais comuns são pelo emprego de: jatos de água fria, de água quente ou de ar comprimido; soluções ácidas e alcalinas; remoção de óleos e graxas superficiais; aspiração a vácuo; solventes voláteis; e saturação com água. Um preparo e limpeza impróprios podem prejudicar integralmente um reparo ou reforço, ainda que os materiais e os sistemas empregados sejam de qualidade e eficientes [1].

### **3.2 Tratamento de fissuras**

As fissuras podem ser originadas por causas de tipo reológico, térmico ou mecânico. O estabelecimento da metodologia a ser empregada nos procedimentos de reparação do problema depende do conhecimento prévio do tipo de fissura – ativa ou inativa – presente nos elementos estruturais em questão. As técnicas de

tratamento comumente adotadas são: injeção, selagem e costura (grampeamento) [4].

#### **3.2.1 Técnica de injeção**

Compreende-se por injeção a técnica que assegura o íntegro preenchimento do espaço formado entre as bordas de uma fissura, seja com o objetivo de restaurar o monolitismo, no caso das passivas (situações nas quais se utilizam materiais rígidos, como epóxi ou *grouts*), ou para vedação das ativas, que são casos mais raros, nos quais são empregadas resinas flexíveis do tipo acrílicas ou poliuretânicas a fim de que as acompanhem em seus movimentos [5].

As fissuras com movimentos estabilizados não apresentam nenhum tipo de restrição à reparação por este método, ao passo que as “fissuras vivas” – nas quais a amplitude é variável com o tempo – não se submetem a este tipo de tratamento. Contudo, existem casos em que o movimento é ínfimo e pode-se proceder ao recurso em questão. Por exemplo, em estruturas expostas a mudanças de temperatura e nas quais não se tenham previsto juntas de dilatação. Ressalta-se que, em geral, sempre que se observar movimento não é recomendável executar a injeção, pois o concreto pode sofrer rompimento em outro lugar [4].

#### **3.2.2 Técnica de selagem**

A selagem é a técnica que visa vedar a fissura ativa de modo que, após a correção, seus movimentos continuem existindo sem restrições. Caso seja corrigida com materiais rígidos, novas fissuras tendem a aparecer nas proximidades ou no mesmo local. A fissura ativa funciona como uma junta de movimentação e, uma vez presente, deve ser encarada dessa forma. Por disso, o material empregado para satisfazer as solicitações diferenciais a que a estrutura fissurada está sujeita necessita ser aderente, não retrátil e resistente. Em geral, usa-se o mastic [7].

#### **3.2.3 Técnica de costura ou grampeamento**

Esta técnica visa restituir e reforçar a resistência à tração do concreto; no entanto,

não chega a tornar estanque a fissura. O sistema caracteriza-se pela colocação de grampos de aço que atuam como pontes entre as duas partes do concreto (fragmentadas pela fissura), funcionando como uma costura. As garras de aço são introduzidas em furos previamente executados e, posteriormente, preenchidos com resina epóxi ou argamassas isentas de retração. Os grampos devem ser situados apenas em áreas sujeitas à tração e dispostos com diferentes inclinações, de maneira que o esforço não se transmita em um só plano. É necessário verificar a conveniência do uso desse método, pois, ao empregá-lo, pode haver deslocamento do problema para outra parte da estrutura [4].

### 3.3 Reparos em elementos estruturais

As atividades de reparo ou recuperação consistem em serviços de intervenção que visam garantir a integridade da estrutura, contudo não têm a finalidade de aumentar ou de reconstituir a capacidade portante dos elementos estruturais. Os materiais comumente empregados nesses tipos de serviço são: argamassa (de cimento e areia, com polímeros ou epoxídicas); concreto (com agregado pré-colocado, convencional ou projetado); e *grout* (argamassa de grande fluidez que possui alta resistência, não apresenta retração e é auto adensável) [5].

### 3.4 Recuperação de estruturas corroídas

Uma estrutura de concreto armado submetida à corrosão pode sofrer reparo mediante alguns métodos: por remoção eletroquímica, por controle do processo catódico ou pelo artifício de proteção catódica. O procedimento básico para o tratamento, qualquer que seja o método adotado, deve contemplar: remoção da região afetada pela corrosão, limpeza das armaduras e preparo da superfície do concreto para receber nova camada [8].

### 3.5 Reforço em estruturas de concreto

Chamam-se de trabalhos de reforço todos os serviços de intervenção que têm por objetivo garantir a integridade estrutural e, necessariamente, envolvem introdução de

materiais cuja finalidade é aumentar ou reconstituir a capacidade portante da estrutura.

#### 3.5.1 Reforço mediante adição de chapas de aço

Uma opção eficiente e de rápida execução no tocante à necessidade de adicionar capacidade resistente, indicada especialmente para situações que demandam emergência ou não possibilitam grandes alterações na geometria das peças, é a do reforço exterior mediante adição de chapas de aço por colagem ou chumbamento com o auxílio de resinas injetadas [5].

A resina epóxi propicia a união de aço e concreto. Mediante sua aplicação, a armadura suplementar adicionada ao elemento estrutural danificado é incorporada em forma de chapas de aço coladas ao concreto no lugar adequado [6].

Os principais benefícios desse tipo de intervenção são: agilidade na execução, não utilização de materiais molhados ou úmidos, inexistência de vibrações e baixo nível de ruídos. Além disso, o aumento da seção é muito pequeno e há pouca interferência no uso da estrutura durante a execução da reabilitação [6].

Não obstante, essa técnica sofre críticas quanto a alguns aspectos, a saber: a colagem das chapas impede a visualização de eventuais aparições de fissuras assim como de possíveis deteriorações por corrosão na face interna da viga; baixa resistência da chapa de aço e da resina epóxi a elevadas temperaturas, o que amplia o risco de ruína em situações de incêndio; e tendência de descolamento das extremidades da chapa em relação ao substrato em função de elevadas concentrações de tensão nessa região [6].

#### 3.5.2 Reforço mediante uso de perfis metálicos

A técnica de reforço de elementos estruturais mediante emprego de perfis metálicos é uma das mais antigas dentro do campo em questão; entretanto, exige uma série de precauções durante seu processo

executivo para obter máxima eficiência, muitas vezes desprezadas. Consiste, basicamente, na transferência integral da capacidade resistente do concreto para o aço [5].

### **3.5.3 Reforço mediante protensão externa**

Trata-se de um tipo de reforço no qual se introduzem forças externas adicionais à estrutura por intermédio de cabos e tirantes, utilizando ou não desviadores metálicos, cuja finalidade é contribuir na capacidade resistente dos elementos estruturais que requerem reestabelecimento de suas condições originais, alteradas em função de falhas no projeto ou na execução, do uso inadequado da estrutura ou de causas acidentais que tenham diminuído a capacidade de carga prevista. Em adição, aplica-se, também, à necessidade de suportar cargas superiores às projetadas [8].

O campo de aplicação da protensão externa é amplo e engloba diversas funcionalidades. Em especial, o reforço de vigas de pontes. Geralmente, a incorporação do sistema melhora o comportamento em serviço e aumenta a capacidade portante das vigas. Contribui, ainda, em menor proporção, para resistência ao cisalhamento [9].

Dentre as principais vantagens dessa técnica de reforço, destacam-se: a relativa simplicidade do processo executivo; a ausência de problemas com o cobrimento dos cabos; a possibilidade de inspeção visual e eventual troca dos cabos durante a vida útil; a possibilidade, em muitos casos, da execução do reforço com a estrutura em uso; e pouca ou nenhuma necessidade de demolições durante a obra [10].

Em contraste, o método apresenta desvantagens, pelo fato de seus componentes estarem localizados no exterior dos elementos estruturais, a saber: a vulnerabilidade à ação do fogo, a sujeição à corrosão eletroquímica e os atos de vandalismo. O encapsulamento dos cabos pelo emprego de concreto convencional ou projetado pode ser um mecanismo de proteção de um sistema de protensão externa

contra ambientes agressivos ou situações imprevisíveis [10].

### **3.5.4 Reforço mediante aumento da seção transversal**

Esta metodologia de reforço consiste no aumento das seções de concreto e de armadura de um elemento estrutural existente pela colocação de uma camada adicional. O objetivo de aumentar a seção resistente das peças estruturais é elevar a capacidade de carga, rigidez e ductilidade das mesmas, de modo que a nova camada aplicada à superfície de concreto existente produza um elemento monolítico. Esse método desenvolveu-se sobremaneira por meio da aplicação de concreto e argamassa projetados [10].

Quando o concreto é adequadamente preparado, essa técnica de reforço apresenta boa eficiência, inclusive, em muitos casos, superior à obtida pelos demais métodos. Além disso, oferece preços mais acessíveis e maior disponibilidade em relação ao material e à mão de obra. Todavia, esse sistema produz seções finais com dimensões maiores que as iniciais de projeto, o que pode ser um aspecto problemático em algumas situações. Uma alternativa ao concreto convencional é o chamado de alto desempenho, visto que resulta na formação de espessuras menores, podendo ser adotadas alterações menos significativas no referente às dimensões das peças reforçadas [6].

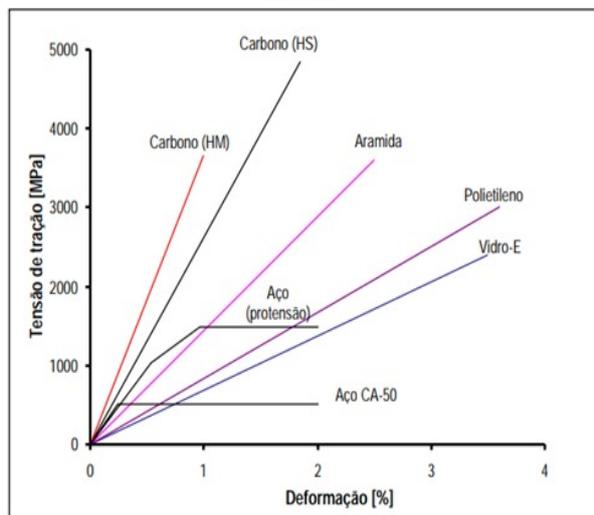
As principais desvantagens observadas são: o alto risco de corrosão das armaduras – em função de reduzidos cobrimentos –; a deterioração do concreto, conseqüentemente; e o aumento da carga permanente atuando sobre a estrutura [10].

### **3.5.5 Reforço mediante emprego de fibras**

Os polímeros reforçados com fibras, FRP (*fiber reinforced polymer*), representam um avanço tecnológico na indústria da construção civil, bastante utilizados em situações de reforço de elementos de concreto armado. Os materiais compósitos – produtos constituídos por dois ou mais materiais que, quando em

conjunto, detêm propriedades superiores às de cada componente separadamente – mais usuais são feitos com fibras de carbono (CFRP), vidro (GFRP) ou aramida (AFRP), em resina polimérica. O emprego desses aplica-se tanto a novas construções quanto ao reforço estrutural, a fim de aumentar as características de ductilidade, resistência, flexão e cisalhamento. Disponibilizam-se em diversas formas: barras de armadura, cabos de protensão, lâminas, mantas ou folhas flexíveis de FRP. A Figura 1 expõe a relação tensão-deformação de fibras e metais [11].

Figura 1 – Diagrama tensão-deformação de fibras e metais



Fonte: Beber [10]

As fibras de carbono, em especial, apesar do custo elevado, são as mais utilizadas, visto que apresentam: notável resistência à fadiga, à tração e a ataques químicos; alto módulo de elasticidade; inércia ao processo de corrosão; baixo peso específico; e baixo coeficiente de expansão térmica – em torno de 50 vezes menor que o do aço [9].

O comportamento do sistema composto estruturado com fibras de carbono ante a ação do fogo deve ser submetido à consideração de dois fatores. O primeiro é que as resinas epoxídicas utilizadas nos materiais são combustíveis e, diante disso, torna-se imprescindível avaliar o seu potencial de geração de fumaça e de propagação de chama. Por último, deve-se analisar a

resistência ao fogo da estrutura reforçada, visto que os sistemas compostos são aderidos externamente ao concreto armado [12].

O processo de aplicação de um reforço externo mediante emprego de fibra de carbono é simples, mas exige uma supervisão criteriosa a fim de garantir a funcionalidade do serviço. Inicialmente, ocorrem a preparação da superfície de concreto para se obter a regularidade do substrato e a remoção de sujeiras e da camada deteriorada. Dessa forma, permite-se melhor absorção da camada de primário a ser aplicada e melhor aderência da camada de concreto. De acordo com a *Fédération Internationale du Béton* (FIB), há valores aceitáveis de irregularidades da superfície para o sistema de reforço pré-fabricado (laminado) e para o curado *in situ* (manta flexível). Eventuais defeitos geométricos ou de execução ao longo da superfície devem ser reparados pela aplicação de argamassas epoxídicas alisadas a espátula [10,13].

Em seguimento, a superfície deve estar isenta de poeiras e resíduos para aplicação do primário, cuja função é reforçar o substrato de concreto para receber a resina de saturação e garantir a adesão do compósito. Após intervalo, procede-se à aplicação da resina de colagem (*undercoating*), do compósito de CFRP e da camada final de recobrimento (*overcoating*), sequencialmente. Para os laminados, a função da resina (de alta viscosidade) é garantir exclusivamente a aderência entre o reforço e o substrato. No caso de mantas flexíveis, a função do adesivo (de baixa viscosidade) contempla não apenas a aderência, mas também a impregnação das fibras. Utiliza-se um rolo, em um único sentido, a fim de pressionar as mesmas, expulsando o ar e o excesso de resina [5,10].

Vale ressaltar que o corte do compósito deve ser feito sob rigorosa dimensão do reforço, previamente à mistura da resina epóxi bicomponente. Quanto mais espessa a camada de adesivo, menor eficiência apresenta o sistema; por outro lado, o desempenho estrutural pode estar

comprometido caso sua quantidade não seja suficiente [10].

#### **4. Estudo de caso**

O estudo de caso consiste na explicação técnica relativa às condições estruturais do teto de um pavimento de uma antiga edificação pública no estado do Rio de Janeiro afetada parcialmente pela ação de um incêndio. Em primeiro momento, são apontados os danos estruturais causados à obra por parte do fogo. Após isso, com a análise do estado de conservação remanescente da estrutura, são sinalizadas as intervenções de reforço e recuperação estrutural adotadas, bem como medidas complementares necessárias ao pleno restabelecimento das condições de utilização.

##### **4.1 Caracterização da estrutura**

O edifício teve seu projeto elaborado e construção executada nos anos 50. Trata-se de uma estrutura de concreto armado com espaçamentos regulares: vigas transversais espaçadas a cada 2,45 m e pilares a cada quatro vigas, isto é, espaçados de 7,35 m no sentido longitudinal do prédio. No sentido transversal, apresenta largura de 25 m, aproximadamente, e dispõe de três linhas de pilares (nas fachadas e uma linha intermediária). A altura total das vigas transversais é de 68 cm. Ao todo, o trecho é composto por 30 lajes, 32 vigas e 12 pilares.

##### **4.2 Estado remanescente da estrutura**

Uma das principais dificuldades na avaliação de danos estruturais proporcionados por incêndio é a ausência de dados técnicos oficiais como o tempo de duração e as temperaturas atingidas. A observação do estado geral remanescente do andar sinistrado permite a ideia inicial do nível elevado de temperatura provocada pela ação do fogo. Diante dos diversos problemas existentes, relacionados ao acidente ou com origem nos vícios da construção, sobressaem-se os sérios danos estruturais decorrentes das severas condições impostas pelo fogo em regiões específicas.

##### **4.2.1 Danos aos materiais**

Os testemunhos de pilares, vigas e lajes, extraídos ao longo do trecho mais intensamente afetado para a realização de ensaios tecnológicos, permitem observar quase total manutenção da coloração original do concreto. No que tange à avaliação da resistência à compressão do material, a amostragem geral dos ensaios exibiu uma grande dispersão de valores, com faixa de variação de 18,6 a 44,5 MPa. Contudo, pode-se inferir que a obra apresenta boa qualidade de concreto em termos de manutenção de resistência mecânica, adequada às condições do projeto original.

##### **4.2.2 Danos estruturais**

Dentre todos os problemas ocorridos em incêndios, os danos em pilares são, normalmente, os de maior gravidade, visto que podem comprometer as condições de adequada sustentação do prédio e representam riscos à estabilidade global. Devido ao elevado valor de carga a que estão sujeitos, exigem escoramento diferenciado ou mesmo intervenções de reforço imediatas.

No estudo em questão, não são observadas perigosas fissuras ou trincas de cisalhamento (decorrentes da dilatação diferencial entre o piso e o teto pela atuação do fogo). Sendo assim, os danos caracterizam-se restritamente a deslocamentos nas arestas.

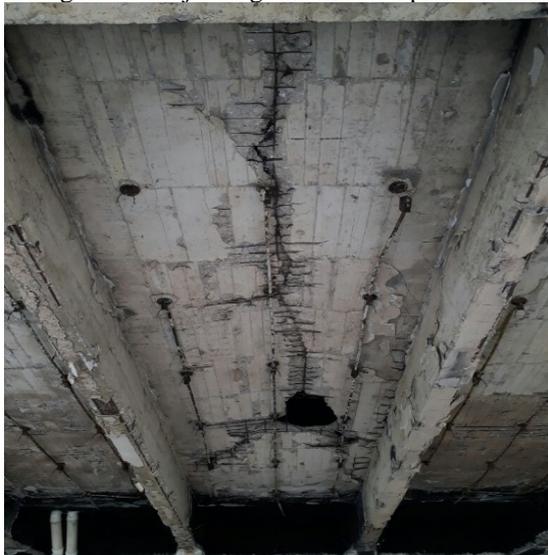
As vigas não denotam danos de maior gravidade, face ao estado remanescente observado. Os prejuízos, na generalidade, relacionam-se a deslocamentos nos bordos, também associados à dilatação diferencial entre as camadas mais superficiais e as mais internas da peça.

Portanto, os principais assuntos resumem-se à exposição direta das barras ao fogo e à possibilidade de perda de aderência entre o aço e o concreto. Em ambas as situações mencionadas, há a perspectiva de redução da capacidade resistente da viga. Interessa ressaltar que não são constatadas deformações relevantes ou intenso quadro de fissuração nas peças.

As lajes são, usualmente, os elementos estruturais mais afetados em situações de incêndio em função de maior área de contato em toda superfície. As inspeções não demonstram danos significativos no tocante à plastificação dos apoios. Mesmo nos painéis mais atingidos e com fortes sinais de ruptura, não são observadas excessivas deformações em sua grande maioria.

O estado remanescente dos painéis retrata-se como uma antítese: alguns mostram indícios superficiais de danos; em contraposição, em determinadas regiões mais afetadas diretamente pelo incêndio, inúmeros deles encontram-se integralmente comprometidos (com expressivas trincas e com armadura exposta na face inferior), conforme Figura 2, e, devido ao reduzido valor das cargas atuantes, não ruíram completamente.

Figura 2 – Laje integralmente comprometida



Fonte: O autor [2018]

### 4.3 Descrição e análise das intervenções adotadas

As intervenções de reforço estrutural apresentadas contemplam restritamente as peças que demonstram anomalias graves em decorrência da ação do incêndio: os painéis de laje com deformação excessiva e trincas expressivas. Ao passo que os serviços executados em vigas e pilares tratam-se de recuperação estrutural, visto que os danos são

superficiais. Todas as medidas devem assegurar a integridade e a plena utilização normal da estrutura e são subordinadas a soluções técnicas e procedimentos executivos usuais em obras do gênero.

#### 4.3.1 Tratamento dos pilares

Verificadas a preservação das características mecânicas dos materiais e a ausência de fissuras ou trincas de cisalhamento, bem como os danos relacionados exclusivamente a deslocamentos, consideraram-se necessários apenas serviços de recuperação estrutural convencional.

Em síntese, a técnica executiva consiste na remoção da camada superficial deteriorada pela ação do fogo, no apicoamento do concreto, no lixamento da armadura exposta com escova de aço, na aplicação de produto específico inibidor de corrosão, na limpeza da superfície e, posteriormente, na aplicação de argamassa polimérica projetada na espessura da ordem de 3 cm, cuja resistência à compressão é 25 MPa. Os materiais utilizados na composição são idênticos aos adotados no tratamento de vigas e lajes.

Avalia-se que o processo executivo foi desempenhado de forma correta, obedecendo às prescrições e à sequência exigidas. Destaca-se que o controle tecnológico da argamassa polimérica, fundamental para o sucesso do serviço, deu-se de maneira satisfatória. O rompimento dos corpos de prova moldados relativos aos pilares, nas idades de 7 e 28 dias, indicaram resultados todos superiores a 25 MPa.

Antes da execução da projeção de argamassa polimérica, identificou-se que três dos doze pilares possuíam trechos em aberto muito profundos em função do deslocamento, chegando a 17 cm em alguns casos. Por isso, exigiu-se a reconstituição de sua forma geométrica original (seção transversal de 50 cm por 80 cm e altura igual a 4,55 m) com *grout*, visto que a argamassa resultaria em espessuras incapazes de se auto sustentarem, ao passo que o microconcreto tem a capacidade de atingir altas resistências.

Por fim, aponta-se, ainda, a contribuição do hidrojateamento das superfícies de todos os pilares, previamente ao procedimento de projeção, o que possibilitou a remoção de sujeiras e da coloração preta impregnada provocada pela fumaça.

A Figura 3 mostra o aspecto visual de um pilar antes e após a sua recuperação.

Figura 3 – Tratamento de pilar



Fonte: O autor [2018]

#### 4.3.2 Tratamento das vigas

Assim como no caso dos pilares, garantida a preservação das características mecânicas dos materiais, bem como a ausência de anomalias – deformação excessiva ou intensa fissuração –, consideraram-se necessários apenas serviços de recuperação estrutural para as vigas.

O tratamento indicado acompanhou a solução tradicional em obras do gênero mediante a substituição da camada superficial do concreto, corrompida pela ação do calor, sem a adoção de armaduras complementares. Em termos de processo executivo, a técnica de encamisamento, a qual subordinou-se à projeção de argamassa polimérica, ilustrada pela Figura 4, contemplou a aplicação de uma camada com espessura da ordem de 3 cm nas faces laterais e na face inferior. Previamente, efetuaram-se, em ordem: a remoção da

camada superficial do concreto diretamente afetada pelo fogo (entre 5 e 10 mm de espessura) e o apicoamento da superfície, a fim de permitir a aderência entre o concreto original e a nova argamassa projetada. Em adição, realizou-se o lixamento das armaduras expostas ao fundo das peças e, em seguida, aplicação de produto específico inibidor de corrosão. Semelhante ao tratamento de pilares, o hidrojateamento das superfícies viabilizou a remoção de sujeiras e da coloração preta impregnada provocada pela fumaça.

Figura 4 – Tratamento de viga



Fonte: O autor [2018]

As vigas cujas faces inferiores apresentaram trechos com armaduras longitudinais aparentes, em virtude de deslocamentos originados pela ação do fogo, e sem aderência foram preenchidas com *grout* auto adensável com pedrisco classe C30 para recomposição geométrica do bordo das peças.

Alguns trechos específicos sofreram deslocamentos agravados pela execução do apicoamento, pois o equipamento utilizado – martetele rompedor – causou impactos negativos em regiões adjacentes.

Quanto ao controle tecnológico da argamassa polimérica, os corpos de prova coletados foram moldados por lance, isto é, o conjunto formado por uma laje e suas respectivas vigas. Os rompimentos indicaram resultados todos superiores a 25 MPa.

Durante o processo executivo, observou-se a existência de quadros de fissuras. Pode-se inferir que, em função de ocorrências predominantemente próximas aos apoios (região com menor densidade de armaduras longitudinais positivas e negativas) e na direção vertical (às vezes com ligeira inclinação), tratam-se de fissuras características de esforços de tração (pela dilatação térmica), combinados com flexão e cisalhamento.

A metodologia de correção do sintoma aplicada teve por base a classificação das fissuras quanto à abertura. Visto que todas denotaram valores superiores a 0,3 mm, tiveram tratamento compreendido pela técnica de injeção de resina epoxídica, a fim de reconstituir a monoliticidade e integridade das vigas, bem como sua durabilidade.

Em todos os casos, a sequência executiva contemplou: abertura de furos não muito profundos; limpeza intensa da fissura e dos furos com ar comprimido para remoção de poeiras; instalação de purgadores de diâmetro inferior ao da furação alternadamente em relação ao eixo da fissura; aplicação de massa epóxi de selagem para vedação da abertura em toda sua extensão e das áreas em torno dos tubos de encaixe; verificação da intercomunicabilidade dos bicos de injeção e da qualidade da selagem através de ar comprimido; e, por fim, injeção da resina epoxídica (mediante auxílio de compressor) que, por se tratar de superfície vertical, exigiu início pelo purgador mais baixo seguindo, em ordem, até o tubo superior. Concluiu-se o serviço com o corte dos bicos de injeção. Em síntese, não houve implicações negativas quanto à recuperação, adicionando-se, ainda, o fato da existência de fissuras transpassantes, que exigiram maior atenção.

### **4.3.3 Tratamento das lajes**

Verificada a presença de anomalias e de painéis comprometidos, consideraram-se necessários serviços de recuperação e de reforço estrutural para as lajes. O seu tratamento exigiu maior atenção nas etapas executivas, visto que foram os elementos mais diretamente atingidos pela ação do fogo

e cujas consequências demonstraram-se problemáticas.

Os painéis de laje foram classificados segundo seu estado remanescente e danos identificados em três situações distintas. O “Grupo A” tem as seguintes características: regiões com danos superficiais; armaduras expostas ou não; e fissuras ou trincas de menor abertura. O “Grupo B” diferencia-se do anterior apenas por abranger trincas de grande abertura e passíveis de reforço. Enquanto o “Grupo C” é composto por painéis inteiramente ou parcialmente comprometidos com sinais evidentes de ruptura.

Em virtude da espessura reduzida das lajes – projetadas com 7 cm, mas identificadas com apenas 5 cm em determinadas regiões –, mesmo aquelas pertencentes ao grupo A sofreram intervenções de reforço mediante a introdução de armaduras complementares pela face inferior e de compósitos de fibras de carbono na face superior.

Anteriormente à execução do reforço em si, previram-se, em ordem, os serviços de remoção da camada superficial afetada pela ação do fogo, apicoamento e tratamento das armaduras inferiores originais por meio de jateamento abrasivo, bem como de eventuais fissuras ou juntas de concretagem. Na parte relativa ao reforço positivo, isto é, na face inferior dos painéis, exigiu-se a técnica de projeção de argamassa polimérica com a aplicação de uma camada de 3 a 4 cm de espessura, juntamente à utilização de telas eletrosoldadas.

Vale ressaltar que, para o efetivo sucesso do processo de recuperação e reforço, deve-se reduzir ao máximo o efeito nocivo da retração hidráulica (uma vez que não pode ser combatido por total), pois é esse que gera a perda de aderência entre o material existente e o de revestimento. Portanto, a definição de uma correta dosagem da argamassa e uma cura cuidadosa são importantes fatores de contribuição. De igual forma, a adição de armadura complementar é um fundamental recurso por dois motivos: contribui para

redistribuição da fissuração e colabora para que não ocorra o descolamento da camada de argamassa projetada.

O valor adotado de espessura da laje de 9 cm contemplou: a espessura original de 7 cm, a remoção da camada superficial deteriorada de 1 cm e a camada de argamassa projetada de 3 cm. Utilizaram-se telas eletrosoldadas transpassadas de 10 cm. Para a ancoragem nas vigas de bordo, previu-se a instalação de barras individuais (esperas) de diâmetro 6,3 mm, comprimento igual a 50 cm, espaçadas a cada 20 cm umas das outras e fixadas através de resina epoxídica aplicada em furos previamente executados.

Exigiu-se, ainda, o escoramento de todos os painéis de laje com torres metálicas (quatro por laje, de tamanho 1 m x 1 m, com capacidade de carga mínima de 6 tf), as quais cumprem, também, a função de corrigir eventuais deformações.

Quanto às falhas de execução do tratamento, destaca-se que não se realizou o nivelamento das lajes com excessivas deformações, cujo reparo deveria ter sido executado pelas torres metálicas, mediante sua regulação nos pontos críticos; ou, como sugestão, pela utilização de escoras telescópicas em trechos mais específicos. Como consequência das deformações, a espessura de argamassa projetada foi de 3 cm no centro dos painéis, enquanto nas extremidades foi da ordem de 5 a 6 cm. Além disso, algumas malhas de aço foram introduzidas já apresentando sinais de corrosão por causa de seu precário armazenamento (exposição à chuva). E, por último, o preenchimento de alguns vazios entre os espaços da malha de aço, ocasionados pela falha na projeção, foram executados manualmente pelos pedreiros.

Em seguimento, o tratamento indicado aos painéis do grupo B diferenciou-se apenas pela necessidade de prévia recuperação das trincas existentes. Considerada a reduzida espessura da laje e o visível fendilhamento, a solução contemplou a demolição localizada de uma faixa de 10 cm para cada lado da trinca, aproximadamente. Logo após,

executou-se a reconcretagem com a utilização de *grout* auto adensável com pedrisco (classe C30). Ao final dessa etapa, as lajes subordinaram-se às atividades e aos detalhes executivos idênticos aos do grupo A, cujo aspecto visual é ilustrado pela Figura 5.

Figura 5 – Tratamento de lajes dos grupos A e B



Fonte: O autor [2018]

Finalmente, a solução recomendada ao grupo C, formado pelos painéis inteiramente ou parcialmente comprometidos, consistiu no seguinte processo: escoramento prévio das lajes; demolição; remoção das armaduras positivas existentes, mantendo-se segmentos de 50 cm junto às vigas; preservação das barras negativas; adição de telas eletrosoldadas; e reconstrução dos painéis com espessura de 8 cm mediante a utilização de concreto C25, garantindo um cobrimento de 2 cm. Deve-se constatar que a demolição de um painel, etapa elucidada pela Figura 6, altera as condições de apoio dos vizinhos e os esforços que neles atuam, podendo resultar em deformações nas lajes adjacentes. Dessa maneira, o serviço exigiu especial cuidado ao ser executado.

Positivamente, destaca-se que o controle tecnológico assegurou a resistência do concreto à compressão. O maior valor obtido nos ensaios, pelo rompimento de duas séries com 6 corpos de prova cada, para as idades de 3, 7 e 28 dias, foi de 31,7 MPa. Como aspecto negativo, identificaram-se algumas falhas de concretagem, corrigidas com aplicação de

*grout*. Além disso, algumas armaduras não atingiram o cobrimento mínimo exigido e apresentaram indícios de corrosão.

Figura 6 – Tratamento de lajes do grupo C



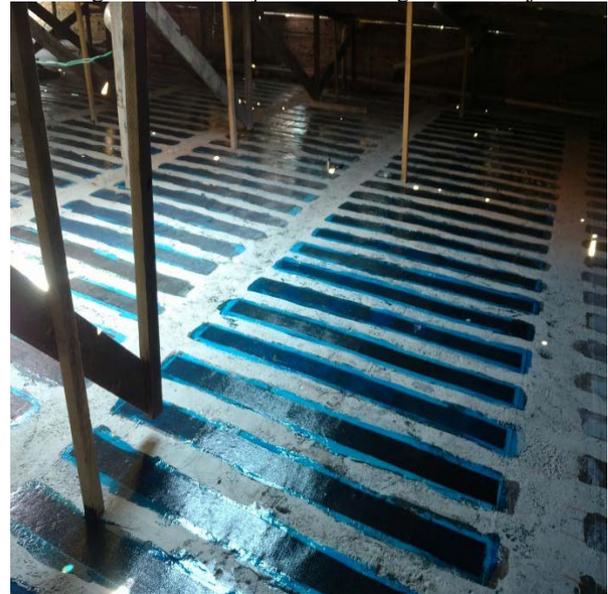
Fonte: O autor [2018]

Embora as inspeções realizadas não tenham identificado problemas relacionados à plastificação dos apoios, realizaram-se, também, intervenções na face superior das lajes para a plena garantia de segurança. Tal recomendação deve-se à reduzida espessura das lajes e ao curto comprimento das barras superiores, uma vez que pequenos deslocamentos verticais podem ocasionar redução na capacidade resistente à flexão negativa. Além disso, apontam-se os sérios danos constatados em boa parte dos painéis.

A técnica adotada para o reforço à flexão negativa das lajes consistiu no emprego de compósitos de fibras de carbono (CFRP). Os serviços previstos em projeto contemplaram: lixamento da superfície; limpeza da superfície (com recomendações de atestação da umidade do substrato inferior a 4% e certificação de temperatura maior que 5° C); aplicação de *primer*; regularização e nivelamento do substrato (considerando irregularidade

permissível de 4 mm em um comprimento 2 m); aplicação de uma camada da resina de impregnação; colagem da manta de fibra de carbono (com largura de 15 cm e espaçadas 35 cm entre eixos); e aplicação da resina de revestimento, garantido a impregnação da fibra. O resultado final pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Reforço à flexão negativa em laje



Fonte: O autor [2018]

Adotou-se, a critério da administração da obra, um procedimento que, a princípio, substituiria as etapas de lixamento e de regularização do substrato. Consistiu na execução de uma camada de concreto de 2 cm de espessura, e com resistência à compressão de 25 MPa, acima das lajes existentes. A justificativa baseou-se nas dificuldades encontradas na área de interesse. O trecho com laje dupla – configurado como um entreferro – abrange 73% dos painéis. Por se tratar de espaço confinado, insalubre, de difícil acesso e de limitada possibilidade de locomoção, considerou-se o lixamento prejudicial à saúde dos operários, bem como a inviabilidade de realização dos serviços nos pontos mais distantes da saída do entreferro.

O procedimento adotado pode ser criticado por alguns motivos, a saber:

- a) Não era a solução prevista em projeto;

- b) Sobrecarga causada pelo peso do concreto;
- c) Não se executou o apicoamento da interface dos concretos novo e antigo, ou seja, não houve qualquer garantia de aderência entre os mesmos;
- d) Minimamente, deveria ter sido considerada a aplicação de uma resina de colagem, a fim de assegurar a aderência entre os concretos de diferentes idades. Adiciona-se a isso o fato de a limpeza da superfície e a remoção de poeira não terem sido executadas adequadamente.

Sobre a nova camada, foram executados: aplicação de *primer* e de resina de impregnação, colagem de manta de fibra de carbono e aplicação de resina de revestimento. Conclui-se, em tempo, que o sistema não trabalha apropriadamente com a camada de concreto pré-existente (a própria laje), mas sim com a nova camada adicionada. Visto que as interfaces não possuem conexão efetiva, os compósitos podem não exercer corretamente sua função no reforço à flexão negativa. A Figura 8 ilustra a conclusão da execução de nova camada de concreto

Figura 8 – Tratamento de laje do entreferro



Fonte: O autor [2018]

A Figura 9 exibe o aspecto visual final após a colagem da manta de fibra de carbono em laje do entreferro.

Figura 9 – Reforço de laje do entreferro com manta de fibra de carbono



Fonte: O autor [2018]

## 5. Considerações finais

Diante de todos os aspectos apresentados, a ação do fogo em estruturas de concreto armado pode acarretar um quadro amplo de danos, abrangendo desde casos simples – superficiais ou restritos à estética – a casos extremos, que envolvem significativos prejuízos aos materiais de construção e alteração de suas propriedades mecânicas; que geram sério comprometimento à estabilidade da estrutura e ao desempenho original previsto; e que implicam problemas graves de ruptura de elementos ou colapso de toda a obra.

O trabalho desenvolvido demonstrou que qualquer situação de incêndio necessita ser tratada com criteriosa atenção. A análise técnica de uma obra sinistrada deve submeter-se ao âmbito da engenharia estrutural, da tecnologia dos materiais e da patologia das construções, a fim de se ajuizar adequadamente a possibilidade de aproveitamento da estrutura, com todas as intervenções necessárias de recuperação e reforço, ou de demolição e reconstrução, no caso contrário. Finalmente, espera-se que essa pesquisa possa contribuir para futuras investigações científicas.

## 6. Referências

- [1] HELENE, P. Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto. 2ª Ed. São Paulo: Pini, 1992.
- [2] CÁNOVAS, M. F. Patología y Terapéutica del Hormigón Armado. 2ª Ed. Madrid: Editorial Dossat s.a, 1984.
- [3] FAKURY, R. H; SILVA, A. L. R. de C; CALDAS, R. B. Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- [4] CÁNOVAS, M. F. Patologia e Terapia do Concreto Armado. Tradução, 1ª Ed. São Paulo: Pini, 1988.
- [5] SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: Pini, 1998.
- [6] REIS, A. P. A. R. Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho. Dissertação. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1998.
- [7] FIGUEIREDO, E. J. P. Terapia das construções de concreto: metodologia de avaliação de sistemas epóxi destinados à injeção de fissuras passivas das estruturas de concreto. Dissertação. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1989.
- [8] TRINDADE, D. S. Patologia em estruturas de concreto armado. Rio Grande do Sul: Universidade Federal de Santa Maria, 2015.
- [9] ALMEIDA, T. G. M. de. Reforço de vigas de concreto armado por meio de cabos externos protendidos. Dissertação. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2001.
- [10] BEBER, A. J. Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono. Tese. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
- [11] REIS, L. S. N. Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado. Dissertação. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.
- [12] MACHADO, A. de P. Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono. 1ª Ed, 271p. São Paulo: Pini, 2002.
- [13] FIB - Fédération Internationale du Béton. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Lausanne: Bulletin 14, 2001.