

Concreto em altas temperaturas: um estudo de caso sobre um incêndio em edifício residencial em Minas Gerais

Concrete at high temperatures: a case study of a fire in a residential building in Minas Gerais

Hormigón a altas temperaturas: estudio de un caso de incendio en un edificio de viviendas en Minas Gerais

Recebido: 21/07/2021 | Revisado: 26/07/2021 | Aceito: 26/07/2021 | Publicado: 28/07/2021

Jackyel Venâncio Andrade Campos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1623-8924>

Universidade Presidente Antônio Carlos, Brasil

E-mail: jackyelv1@gmail.com

Elvys Dias Reis

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9848-125X>

Universidade Presidente Antônio Carlos, Brasil

E-mail: elvysreis@yahoo.com.br

Carlos José Dias

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8785-7282>

Universidade Presidente Antônio Carlos, Brasil

E-mail: carlos.je.dias@hotmail.com

Heron Freitas Resende

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7723-2518>

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

E-mail: heronfr@hotmail.com

Resumo

Este artigo trata de um diagnóstico estrutural realizado no Edifício Residencial Afonso Alves, em Barbacena, Minas Gerais, após a ocorrência de um incêndio que danificou todas as estruturas de concreto armado. Primeiramente, foi feita uma revisão bibliográfica sobre o comportamento do concreto quando submetido a altas temperaturas, explanando sobre os principais fenômenos físicos e químicos que ocorrem nessa condição e discorrendo sobre os efeitos observados desde a microestrutura do concreto até uma análise macroscópica. Além disso, discorreu-se sobre as reações que se desencadeiam quando o concreto armado endurecido está sofrendo o processo de aumento da temperatura, alcançando altas temperaturas e também quando ele sofre o processo de resfriamento. Na sequência foram apresentadas as principais patologias encontradas nas estruturas de concreto armado, suas principais causas, efeitos e formas de preveni-las, visando preservar a vida útil prevista na concepção do projeto. Destacou-se ainda a extrema importância do Projeto de Prevenção e Combate a Incêndio e Pânico (PPCI) nas edificações, sejam elas residenciais, comerciais ou industriais. Em seguida foi feita a descrição do edifício estudado, apresentando o diagnóstico estrutural de forma detalhada, indicando as principais estruturas afetadas pelo incêndio, as inspeções visuais em todas as estruturas visíveis e os resultados dos ensaios destrutivos e não destrutivos. Por fim, foram apontadas algumas medidas de recuperação que devem ser adotadas para tratar as patologias que estão comprometendo a estabilidade e durabilidade das estruturas de concreto armado, além de recomendar alguns reforços estruturais, a fim de garantir a segurança do edifício e de seus ocupantes.

Palavras-chave: Estruturas de concreto armado; Altas temperaturas; Patologias; Segurança estrutural.

Abstract

This paper deals with a structural diagnosis carried out in the Afonso Alves Residential Building, in Barbacena, Minas Gerais, after the occurrence of a fire that damaged all the reinforced concrete structures. First, a bibliographic review was made on the behavior of concrete when submitted to high temperatures, explaining the main physical and chemical phenomena that occur in this condition and discussing the effects observed from the concrete microstructure to a macroscopic analysis. Besides, it was discussed the reactions that are triggered when the hardened reinforced concrete is undergoing the process of temperature increase, reaching high temperatures and also when it suffers the cooling process. The main pathologies found in reinforced concrete structures, their main causes, effects and ways to prevent them were presented, to preserve the useful life foreseen in the project's conception. It was also highlighted the extreme importance of the Fire and Panic Prevention and Combat Project in buildings, whether residential, commercial or industrial. Next, the description of the studied building was made, presenting the structural diagnosis in a detailed way, indicating the main structures affected by the fire, the visual inspections in all the visible structures and the results of the destructive and non-destructive tests. Finally, some recovery measures were pointed out that

should be adopted to treat the pathologies that are compromising the stability and durability of the reinforced concrete structures, besides recommending some structural reinforcements, to guarantee the safety of the building and its occupants.

Keywords: Reinforced concrete structures; High temperatures; Pathologies; Structural safety.

Resumen

Este artículo trata de un diagnóstico estructural realizado en el Edificio Residencial Afonso Alves, en Barbacena, Minas Gerais, tras un incendio que dañó todas las estructuras de hormigón armado. En primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica sobre el comportamiento del hormigón cuando se somete a altas temperaturas, explicando los principales fenómenos físicos y químicos que ocurren en esta condición y discutiendo los efectos observados desde la microestructura del hormigón hasta un análisis macroscópico. Además, se discutió sobre las reacciones que se desencadenan cuando el hormigón armado endurecido se somete al proceso de aumento de temperatura, alcanzando altas temperaturas y también cuando se somete al proceso de enfriamiento. En la secuencia, se presentaron las principales patologías encontradas en las estructuras de hormigón armado, sus principales causas, efectos y formas de prevenirlas, con el objetivo de preservar la vida útil prevista en el diseño del proyecto. También se destacó la extrema importancia del Proyecto de Prevención y Extinción de Incendios y Pánico (PPCI) en los edificios, ya sean residenciales, comerciales o industriales. A continuación se realizó la descripción del edificio estudiado, presentando el diagnóstico estructural en detalle, indicando las principales estructuras afectadas por el incendio, las inspecciones visuales en todas las estructuras visibles y los resultados de los ensayos destructivos y no destructivos. Finalmente, se señalaron algunas medidas de recuperación que deberían adoptarse para tratar las patologías que están comprometiendo la estabilidad y la durabilidad de las estructuras de hormigón armado, además de recomendar algunos refuerzos estructurales, con el fin de garantizar la seguridad del edificio y de sus ocupantes.

Palabras clave: Estructuras de hormigón armado; Altas temperaturas; Patologías; Seguridad estructural.

1. Introdução

O concreto possui boas características térmicas que aumentam a viabilidade do seu uso quando o assunto é resistência a elevadas temperaturas. Algumas dessas características são: baixa condutividade térmica, incombustibilidade e melhor resistência a altas temperaturas quando comparado com outros materiais usados na construção civil, tais como madeira e metal. Esse é um dos motivos que o torna um dos materiais mais utilizados no mundo, inclusive no Brasil, em que grande parte das edificações são construídas em concreto armado, seja para fins residenciais, comerciais e industriais.

Apesar de o concreto armado estar entre os materiais mais utilizados na construção civil, destacando-se pelo bom desempenho quando submetido a altas temperaturas, ele depende de uma série de fatores para alcançar este desempenho. Os principais deles são: propriedades dos materiais dos quais ele é constituído, dosagem dos materiais utilizados na sua composição, forma de aplicação e o processo de cura. Ainda que ele apresente boas características térmicas, a partir de determinadas temperaturas e tempo de exposição ele começa a sofrer degradação física, redução da aderência entre a armadura e o concreto e perda de resistência mecânica. Vale ressaltar que as estruturas de concreto sofrem danos não só quando estão sob elevadas temperaturas, mas também quando estão sendo arrefecidas, após o superaquecimento.

Outro fator que merece a atenção dos profissionais do ramo da construção civil e que trabalham com concreto são as patologias. Em suma, denomina-se patologia como toda e qualquer ação que venha a reduzir o tempo de vida útil ou impactar negativamente nas propriedades de resistência das estruturas de concreto armado. Diversos cuidados devem ser tomados para prevenir que elas surjam, todavia, se surgirem, deve-se tratá-las de maneira adequada.

Neste aspecto, as estruturas de concreto armado tendem a ser deterioradas naturalmente pela ação de intempéries no decorrer do tempo, porém dois fatores podem acelerar esse processo ou até mesmo levar a estrutura a sofrer uma ruína prematura, o primeiro se dá pelos erros na elaboração e execução dos projetos, já o segundo é caracterizado pelas causas externas (choque mecânicos, corte da estrutura sem consultar o projetista, etc.). As patologias mais comuns nas estruturas de concreto armado são as fissuras, as trincas, as rachaduras e a corrosão das armaduras. De modo geral, elas possuem vários níveis de gravidade, sendo que alguns requerem apenas um tratamento simples e outras podem impactar no colapso das estruturas, porém é importante ressaltar que todas elas carecem de atenção e precisam ser avaliadas por um profissional técnico

capacitado.

Dentro deste contexto, pode-se afirmar que estudar as patologias desenvolvidas no concreto armado quando submetido a altas temperaturas é extremamente importante porque eventos dessa natureza colocam a vida das pessoas em risco. Neste sentido, pesquisas nesta área podem contribuir para a prevenção de incêndios, para a compreensão de fenômenos indesejáveis desenvolvidos nas estruturas de concreto armado quando submetidas a altas temperaturas e para o desenvolvimento de metodologias de reforço, recuperação e reabilitação destas estruturas.

Em se tratando de projetos, destaca-se que o Projeto de Prevenção e Combate a Incêndio e Pânico (PPCI) é um item fundamental ao planejar e executar uma edificação. Além de ser obrigatório por lei, ele tem o intuito de manter as edificações seguras, contribuir para a preservação do tempo de vida útil das estruturas, preservar vidas humanas e bens materiais. O projeto deve ser elaborado por profissionais habilitados, aprovado pelo Corpo de Bombeiros Militar da região e executado conforme o projeto.

Considerando todos os aspectos supracitados, a maior motivação para desenvolver este trabalho foi o incêndio ocorrido no dia 15 de março de 2020, no Edifício Residencial Afonso Alves, no município de Barbacena – MG, o qual deixou uma vítima fatal e outras nove em estado grave, além de danos estruturais na edificação. Após a avaliação da perícia e a análise dos resultados de vários ensaios de campo e de laboratório, foram discutidas quais seriam as melhores alternativas para reforçar e recuperar as estruturas da edificação e para a posterior reocupação do edifício. Portanto, este trabalho visa estudar o comportamento das estruturas de concreto armado quando submetidas a altas temperaturas por meio de uma metodologia que consiste em uma ampla revisão de literatura e em um estudo de caso detalhado sobre o incêndio supracitado, explicitando os resultados de todos os ensaios laboratoriais realizados com os testemunhos extraídos da edificação. Pretende-se propor possíveis soluções para tratar as patologias ocasionadas por incêndios e para reabilitar as edificações, além de medidas preventivas contra incêndios em edificações em geral.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Comportamento do concreto quando submetido a altas temperaturas

Segundo Ferreira (1998 *apud* Costa *et al.*, 2002), o concreto é fisicamente deteriorado quando submetido a altas temperaturas. Os principais fenômenos físicos apresentados nesta condição são a delaminação das camadas superficiais, a friabilidade da superfície calcinada e o lascamento, sendo esse último também conhecido como “spalling”. O primeiro é referente à exposição contínua das camadas superficiais do concreto à ação da temperatura, em que o mesmo subtrai consideravelmente a resistência à abrasão, levando ao segundo fenômeno, que em suma é o esfarelamento da superfície das peças de concreto. O terceiro consiste na perda de aderência de uma parte considerável do concreto endurecido da superfície da peça. Além destes fenômenos, Minami *et al.* (1990) relata a intensificação da redução do coeficiente elástico do concreto e a formação de fissuras devido à geração de tensões microscópicas desencadeadas pelo aumento da temperatura. Velasco (2002) cita que a trâmite de tensão térmica acontece uma vez que a exposição a elevadas temperaturas gera gradientes térmicos no interior do concreto, os quais geram forças de tração. Tensões locais discordantes entre os agregados e a pasta de cimento também existem, visto que, com o aumento da temperatura, a pasta de cimento contrai e começa a ter sua água dissipada por secagem e desidratação, enquanto os agregados expandem até degradarem quimicamente.

Segundo Cánovas (1988 *apud* Costa *et al.*, 2002), em breves aquecimentos, próximos aos 100 °C, concretos refrigerados progressivamente manifestam um pequeno acréscimo de resistência. Após 100 °C, a elevação e a duração da temperatura influenciam sensivelmente na diminuição da aderência entre a armadura e o concreto. El-Hawary e Hamoush (1996 *apud* Costa *et al.*, 2002), complementam que o diâmetro das barras de aço não interfere na diminuição da aderência entre a armadura e o concreto. Cánovas (1988 *apud* Costa *et al.*, 2002) também descreve que, quando a temperatura ultrapassa os

400 °C, a redução de aderência das armaduras passa a ser maior que a perda de resistência à compressão dos concretos. Dos 600 °C em diante, ocorre a perda total da aderência.

El-Hawary e Hamoush (1996 *apud* Costa *et al.*, 2002) ressaltam também que a diminuição da aderência é consideravelmente maior em estruturas de concreto resfriadas em curto intervalo de tempo por meio de água do que quando refrigerado progressivamente ao ar. Minami *et al.* (1990) também explana sobre o comportamento da estrutura de concreto armado durante o processo de resfriamento após superaquecimento. O autor relata o surgimento repentino de pequenas fissuras durante o processo de queda da temperatura. Ainda neste contexto, Cánovas (1988 *apud* Costa *et al.*, 2002) indica que o ato de combater um incêndio, por exemplo, pode ser tão devastador quanto à atuação do fogo, e explana que o arrefecimento e as súbitas retrações ocasionam gretas.

Segundo Purkiss *et al.* (1996 *apud* Costa *et al.*, 2002), quando esta mudança depende da temperatura, é imprescindível destacar que, devido aos agregados serem os materiais de maior quantidade que compõem a mistura, eles possuem demasiada influência na coloração do concreto. De acordo com Lin *et al.* (1996 *apud* Costa *et al.*, 2002), a coloração escurece progressivamente com o aumento da temperatura, podendo apresentar a cor vermelho-marrom aos 600 °C. Após, transfigura-se para o cinza e, por fim, amarelo-claro, quando a temperatura se aproxima dos 900 °C. Os autores indicam que tal como as rochas sedimentares carbonáticas, algumas rochas metamórficas também podem indicar alterações de cor.

A partir de uma abordagem macroscópica, fica visível que a amplitude de pico da diferença de temperatura entre a superfície e o centro da amostra é controlada pelo teor de água da pasta de cimento (Kanema *et al.* 2007). Apesar de o teor de água da pasta de cimento possuir grande influência sobre o comportamento do concreto exposto a elevadas temperaturas, Minami *et al.* (1990) destaca que as mudanças nas suas propriedades mecânicas não podem ser explicadas apenas pela desidratação da umidade no concreto, pois elas também são influenciadas pela geração de tensões microscópicas e pela formação de fissuras.

Neste mesmo contexto, de acordo com Velasco (2002), os principais fatores que abalam a resistência de uma peça de concreto nestas condições são a diminuição da resistência da pasta de cimento, a avaria do agregado e as tensões iniciadas na interface entre a pasta de cimento e o agregado. Já as alterações químicas, o surgimento de fissuras, a fragmentação dos hidratos de silicato de cálcio e a intensificação da porosidade provocam a diminuição da resistência da pasta de cimento, enquanto a redução de resistência de tração, de compressão, de rigidez (módulo elasticidade) e intensificação da deformabilidade da fluência e elástica são provocadas pelas transformações da estrutura do concreto. A autora complementa dizendo que essas alterações também acontecem nas médias e grandes partículas, que podem apresentar uma implacável divisão em razão da perda de água e não apenas em nível microestrutural (no interior da pasta de cimento hidratada).

Conforme Kakae *et al.* (2017), normalmente o agregado constitui uma parte importante da mistura que compõe o concreto e possui uma primordial influência nas tensões térmicas que provocam sua expansão. Rochas diferentes apresentam diferentes níveis de expansão, mas a mesma rocha nem sempre apresenta os mesmos valores. De acordo com Ba-Zant e Kaplan (1996 *apud* Kakae *et al.*, 2017), um estudo mostra que o calcário tem maior expansão térmica quando sua temperatura varia de 500 °C a 700 °C do que o arenito, mas um outro estudo mostra que o calcário tem menor expansão térmica (Hertz, 2005). Para examinar o efeito do agregado na expansão térmica do concreto, pode ser necessário identificar as propriedades do próprio agregado usado.

Neste sentido, quando se estuda o comportamento do concreto submetido a altas temperaturas, a comunidade científica e as normas técnicas indicam a necessidade de realizar vários ensaios, sendo os principais deles: inspeção visual, ensaio de resistência por esclerometria, medição do módulo de elasticidade, ensaios de resistência à compressão, testes de permeabilidade, medição da profundidade da carbonatação e ensaio de tração e dobramento em barra de aço.

2.2 Patologias nas edificações

O termo “patologia” pode ser comparado com a definição encontrada na Medicina, na qual estudam-se as causas, os indícios e a característica das doenças. Manifestações que venham a alterar e prejudicar o tempo de vida útil da edificação podem ser consideradas como patologias de edificações (Gonçalves, 2015).

Degusa (2008 *apud* Gonçalves, 2015) entende que, na engenharia civil, patologia é a área que estuda os sintomas, os processos, as causas e as origens dos defeitos. Segundo o autor, com base em estudos, pode-se propor os melhores meios para recuperação e a solução dessas questões patológicas, devendo ser incluídos também problemas relacionados ao desgaste natural da estrutura.

As interações entre os agentes externos (ácidos, bases, gases, sais e outros), elementos constituintes (areia, brita, água, cimento e aço) e materiais que lhe são acrescentados (adições minerais e aditivos), ocasionam variações no decorrer do tempo devido ao fato do concreto armado ser um material ativo (Piancastelli, 1998).

2.2.1 Concreto armado

Bastos (2019) define que a composição do concreto possui quatro elementos principais: cimento, água, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (pedra ou brita). Para melhorar ou modificar as propriedades básicas do concreto pode-se acrescentar aditivos químicos. Com o processo adequado de dosagem desses materiais determinam-se as diversas características desejadas, tanto no estado fresco quanto no endurecido.

Na construção de uma estrutura em concreto armado em geral, as armaduras de aço são colocadas em uma fôrma e logo em seguida o concreto fresco é lançado com a intenção de preencher os espaços vazios, envolvendo toda a armadura e simultaneamente o adensamento é feito. Após o concreto ser curado, a fôrma é retirada, originando assim a peça de concreto armado (Bastos, 2019).

No Brasil, as estruturas de concreto armado são predominantes, além de serem comuns em todo o mundo. A disponibilidade dos materiais constituintes do concreto armado e a facilidade de aplicação justificam a larga utilização desse tipo de estrutura no país, compondo os mais variados tipos de construções, como edifícios, viadutos, barragens, pisos, pavimentação rodoviária e aeroviária, paredes de contenção, obras portuárias, entre outras (Bastos, 2019).

2.2.2 Durabilidade e vida útil do concreto armado

A vida útil das estruturas de concreto armado é outro fator importante. No decorrer de sua vida útil, a estrutura naturalmente se sujeita à deterioração natural, devido à ação de cargas e sobrecargas estáticas e/ou dinâmicas, vibrações, impactos, assim como recalques diferenciais em pontos da fundação no decorrer dos anos, erosão e cavitação provocados por agentes sólidos e líquidos em reservatórios, canais e tanques. Isto leva a definir o termo “vida útil” como o tempo em que a edificação consegue manter seus índices mínimos de funcionalidade e resistência. Ampliar este tempo ao máximo é um dos anseios de quem atua na área de construções de edificações (Helene, 2011).

De acordo com os aumentos dos problemas referentes à degradação imatura observados nas estruturas, das novas necessidades competitivas e dos quesitos de sustentabilidade no setor da Construção Civil, observa-se nas últimas duas décadas uma predisposição mundial no sentido de melhorar os aspectos de projeto voltados à durabilidade e à ampliação da vida útil das estruturas de concreto armado e pretendido (Clifton, 1993 *apud* Medeiros, 2011).

2.2.3 Patologias e problemas mais frequentes no concreto armado

As manifestações patológicas mais comuns nas estruturas de concreto armado são as descontinuidades (fissuras, trincas e rachaduras) e a corrosão das armaduras, conforme se detalha a seguir.

2.2.3.1 Fissuras

De acordo com Arivabene (2015) em estruturas de concreto armado, as fissuras são tratadas como demonstração patológica de peculiaridade das estruturas de concreto, sendo esse dano o de ocorrência mais comum e o que não apresenta deformações muito acentuadas, mas é motivo de incômodo aos proprietários e usuários, indicando que algo de irregular está a acontecer.

A norma brasileira ABNT NBR 15575:2013 – Desempenho de edificações habitacionais, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), define fissura de um componente estrutural como sendo o seccionamento na superfície ou em toda seção transversal do componente, com abertura capilar, provocado por tensões normais ou tangenciais. As fissuras podem ser alongadas ou estreitas e se apresentam como aberturas na superfície de um material. Normalmente não apresentam riscos à edificação e sua gravidade pode ser considerada menor e superficial. A norma ABNT NBR 9575:2010 – Impermeabilização, complementa indicando que fissura é a abertura ocasionada pela ruptura de um material ou componente, com abertura inferior ou igual a 0,5 mm.

2.2.3.2 Trincas

Antonino (2019) menciona que trincas são patologias muito comuns nas edificações, podendo ser um alerta de que a estrutura possa estar sofrendo algum processo de danificação que a leve ao colapso. O autor afirma que essa patologia necessita de atenção especial e, antes que se tome qualquer decisão, há necessidade de se consultar técnicos habilitados e especializados para identificar as causas do problema. Neste sentido, Thomaz (1989 *apud* Antonino, 2019), afirma que os profissionais envolvidos na construção devem ter consciência de que podem tomar atitudes para minimizar essa patologia, pois as trincas podem aparecer naturalmente, haja vista que as movimentações de materiais e componentes da edificação são inevitáveis. O autor acrescenta que a trinca é configurada em uma abertura com forma de linha que surge na superfície de qualquer material sólido, resultante de visível ruptura parcial de sua massa, com espessura de 0,5 até 1,0 mm.

2.2.3.3 Cobrimento inadequado das armaduras

De acordo com Silva (2012), o principal objetivo do cobrimento de concreto é proteger a armadura por meio de uma camada homogênea, que atua como uma barreira de proteção física e química. O cobrimento está diretamente relacionado com o processo de corrosão das armaduras, detalhado na alínea seguinte.

Takata (2009 *apud* Silva, 2012) afirma que, para a armadura, o cobrimento é uma proteção que depende não só da qualidade do concreto, mas também de uma camada com espessura adequada. O autor cita que o cobrimento deve, além de fornecer proteção para as armaduras, incluir os estribos, sendo que a medida da cobertura deve ser da face externa até a barra de aço mais próxima.

Em edificações brasileiras, o cobrimento de concreto com pequena espessura é um problema grave, principalmente nas partes inferiores de vigas e lajes. Não existindo a proteção física constituída pela camada de concreto que protege os elementos metálicos da ação dos agentes agressivos, também não haverá a proteção química (passivação do aço), que é considerada a grande garantidora de durabilidade das armaduras (Cascardo; Carasek, 2001). Segundo Dal Molin (1988), quando se dobra o valor do cobrimento de concreto, conseqüentemente amplia-se em quatro vezes a vida útil da armadura.

Posto isso, Oliveira (2014) aponta que em projetos estruturais o cobrimento de armadura deve ser indicado e não deve influenciar de forma considerável no custo e no desempenho do elemento estrutural, porém é aconselhável a execução da estrutura com um valor de cobrimento maior do que o mínimo, para que se obtenha uma estrutura mais durável e com maior vida útil.

2.2.3.4 Corrosão das armaduras

No entendimento de Helene (1993), a corrosão pode ser interpretada como a interação agressiva de uma substância com o meio ambiente, seja por ação química, física, eletroquímica, ou associação destas. As corrosões por ações físicas se caracterizam por ocorrência de erosão e cavitação, já ações eletroquímicas podem ser definidas por processos corrosivos de metais em meios aquosos, e como ações químicas, a corrosão se dá por reações de expansão e de lixiviação dos compostos hidratados da pasta de cimento em concreto e argamassas. Além de cuidados com a qualidade do concreto, são utilizados alguns aditivos que têm função de impossibilitar ou diminuir a corrosão da armadura.

Freire (2005), em sua avaliação, indica que um dos principais fatores de redução da vida útil de uma estrutura de concreto armado está relacionado com a corrosão da armadura, devido à interação do concreto com o meio ambiente. De acordo com a autora, quando a relação água/cimento, tipo de cimento, cura e revestimento forem impróprios às circunstâncias ambientais exigidas, a vida útil da estrutura pode ser reduzida.

2.3 Medidas de prevenção e combate a incêndio e pânico

2.3.1 O fogo

De acordo com Brentano (2004), em relação à segurança de uma edificação, o fogo é um evento imprevisível, capaz de causar danos materiais e perda de vidas humanas. Antes de se determinar a prevenção e o combate a incêndios de uma forma eficiente, deve-se conhecer o processo do fogo em todos os sentidos: causas, formação e suas consequências. Ainda de acordo com o autor, o fogo pode ser definido como uma reação química, denominada combustão, que é uma oxidação rápida entre o material combustível, sólido, líquido ou gasoso, e o oxigênio do ar, provocada por uma fonte de calor.

Segundo Bayon (1978 *apud* Brentano, 2007), o fogo é uma combustão que produz chamas que geram luz e calor, além de emissão de gases, fumaças e outros resíduos. Todos esses componentes derivados da combustão podem levar a diversas consequências, como as que são descritas a seguir:

- Perda da visibilidade provocada pela fumaça, dificuldade da saída e da aproximação para o combate ao fogo, pânico, intoxicação ou asfixia;
- Os gases podem ser tóxicos e invisíveis, e sua difusão provoca a propagação do fogo. Atualmente, com o maior uso de materiais sintéticos nas construções, aumenta-se consideravelmente a produção desses gases tóxicos. Segundo Brentano (2007), cerca de 80% das mortes em incêndios são causadas por esses gases;
- O calor aquece o ar, elevando-o a altíssimas temperaturas e provocando a combustão espontânea de alguns materiais, a deformação e a perda de resistência de outros.

Segundo Gomes (2014) e de acordo com a Norma Técnica 02 – Conceitos básicos de segurança contra incêndio (CBMGO, 2014), do Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás (CBMGO), para a ocorrência do fogo, quatro componentes têm de existir: combustível, comburente (oxigênio), calor e reação em cadeia. Abaixo são descritos os três primeiros:

- Combustível: é qualquer substância que serve de elemento para combustão. Através dessas substâncias a propagação do fogo é potencializada e pode causar grandes incêndios. O combustível pode ser líquido, sólido ou gasoso;
- Comburente: o gás oxigênio é o comburente presente na atmosfera que, ao entrar em contato com o combustível, gera o incêndio. Sem o comburente, não há possibilidade de combustão, logo ele constitui o principal elemento do fogo;
- Calor: forma de energia que se transfere de um sistema para outro em virtude de uma diferença de temperatura.

Estes três elementos, quando atuam concomitantemente, formam uma reação em cadeia que permite estabelecer o tetraedro do fogo. A NT 02 (CBMGO, 2014) acrescenta que os meios de extinção se utilizam deste princípio, pois agem através da inibição de um dos componentes para apagar um incêndio.

2.3.2 Propagação do fogo

Segundo Brentano (2007), o comportamento do fogo é imprevisível e sua propagação depende do tipo de transmissão do calor, que são definidos basicamente de três formas fundamentais, a saber:

- **Condução:** a transmissão do calor se dá pelas próprias labaredas, ou seja, passa de um pavimento para o outro através de aberturas, como janelas e portas, fazendo com que as labaredas entrem em contato com outros materiais combustíveis. A NT 02 (CBMGO, 2014) complementa que a condução ocorre através de um material sólido de uma região de temperatura elevada em direção à outra região de baixa temperatura;

- **Convecção:** a propagação se dá pelo meio circulante gasoso e ar quentes produzidos pelo fogo. Esses gases e o ar quente entram em contato com outros materiais, que são aquecidos até atingir seus pontos de combustão;

- **Radiação:** a propagação de calor ocorre por meio de raios caloríficos, irradiando calor em todas as direções através do espaço. Como exemplo geral, pode-se citar os raios solares. Em edificações, cita-se o calor emitido por radiação de forros e paredes, aquecendo-os até entrar em combustão.

2.3.3 Objetivos da prevenção de incêndio

Segundo a Instrução Técnica (IT) 02/2018, do Corpo de Bombeiros Militar do Estado de São Paulo (CBMSP), os objetivos da prevenção de incêndio, alcançados pelo controle da natureza e da quantidade dos materiais combustíveis constituintes e contidos no edifício, são:

- proteger a vida dos ocupantes das edificações e áreas de risco, em caso de incêndio;
- dificultar a propagação do incêndio, reduzindo danos ao meio ambiente e ao patrimônio;
- proporcionar meios de controle e extinção do incêndio;
- dar condições de acesso para as operações do Corpo de Bombeiros;
- proporcionar a continuidade dos serviços nas edificações e áreas de risco.

Silva e Vargas reforçam ainda que a probabilidade de início e propagação de um incêndio em edifícios é reduzida quando os sistemas de segurança passivos e ativos estão devidamente instalados. Estes sistemas de proteção são detalhados no tópico a seguir.

2.3.4 Projeto de Prevenção e Combate a Incêndio e Pânico

Segundo Gomes (2014), somente profissionais habilitados (engenheiros civis e arquitetos) devem elaborar o Projeto de Prevenção e Combate a Incêndio e Pânico (PPCI), enquanto a fiscalização e a aprovação devem ser feitas pelo Corpo de Bombeiros Militar (CBM), mediante vistorias e concessões de alvarás. Estes alvarás são exigidos por órgãos públicos e visam garantir a segurança das pessoas, sendo obrigatório para todos os tipos de edificação, até mesmo aquelas que estão em reforma.

Em concordância com Brentano (2007), o principal objetivo do PPCI é prevenir perdas materiais e garantir a proteção da vida humana. Um dos princípios básicos do PPCI é evitar o início do incêndio e, havendo a ocorrência do fogo, é necessário que a edificação possua meios adequados para extinguir o fogo em seu local de origem.

Ainda de acordo com Brentano (2007), às medidas de proteção contra incêndios de uma edificação são classificadas em passivas ou ativas, conforme as seguintes descrições:

- **Proteção passiva:** são medidas ligadas à estrutura da edificação ou a alguns sistemas de emergências. São exemplos: afastamento entre edificações; compartimentações horizontais e verticais; controle da fumaça de incêndio; controle dos materiais de revestimento e acabamento; controle das possíveis fontes de incêndio; saídas de emergência; sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA); brigada de incêndio.

- **Proteção ativa:** são medidas de combate ao foco do incêndio, instaladas na edificação em lugares estratégicos. São

exemplos: sistema de detecção e alarme de incêndio; sistema de sinalização de emergência; sistema de iluminação de emergência; sistema de extintores de incêndio; sistema de hidrantes ou mangotinhos; sistema de chuveiros automáticos (“*sprinklers*”); sistema de espuma mecânica, em alguns tipos de risco; sistema de gases limpos ou CO₂, também em alguns tipos de risco.

2.3.5 Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais

O Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG) disponibiliza em sua plataforma online toda a Legislação Estadual referente à Segurança Contra Incêndio e Pânico, além de todas as Instruções Técnicas (ITs) e pareceres publicados pelo Serviço de Segurança Contra Incêndio e Pânico. Algumas destas ITs são descritas a seguir.

A IT 04 (CBMMG, 2014) tem como objetivo estabelecer condições mínimas exigíveis para o acesso de viaturas do Corpo de Bombeiros Militar em edificações e áreas de risco, visando disciplinar o seu emprego operacional no combate a incêndios, atendendo ao previsto no Regulamento de Segurança Contra Incêndio e Pânico do Estado de Minas Gerais. Belezia (1998) argumenta que essa IT fixa condições mínimas exigíveis não só para o acesso, mas também para o estacionamento de viaturas de bombeiros nas edificações e áreas de risco, visando disciplinar o seu emprego operacional na busca e salvamento de vítimas e no combate a incêndios, atendendo ao previsto no Decreto Estadual 46.076/01.

De acordo com a IT 04 (CBMMG, 2014), as vias de acesso para viaturas devem ter largura mínima de 6,0 m, suportar viaturas com peso de 25.000 kgf, altura livre mínima de 4,5 m e desobstrução em toda a largura.

A IT 05 (CBMMG, 2005), por sua vez, determina critérios para isolar externamente os riscos de propagação do incêndio por radiação de calor, convecção de gases quentes e transmissão de chama, para evitar que o incêndio proveniente de uma edificação se propague para outra, ou retardar a propagação permitindo a evacuação do público. Essa IT se aplica a todas as edificações, independentemente de sua ocupação, altura, número de pavimentos, volume, área total e área específica de pavimentos.

A IT 06 (CBMMG, 2018) determina as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram as edificações para que, em situação de incêndio, seja evitado o colapso estrutural por tempo suficiente para possibilitar o atendimento das prescrições contidas nas disposições preliminares do Regulamento de Segurança Contra Incêndio e Pânico nas edificações e áreas de risco no Estado de Minas Gerais. Técnica a ser aplicada em todas as edificações e áreas de risco onde for exigida a segurança estrutural contra incêndio, conforme exigências do Regulamento de Segurança Contra Incêndio e Pânico nas edificações e áreas de risco no Estado de Minas Gerais.

De acordo com Azevedo *et al.* (2007), a segurança estrutural, em situação de incêndio, é verificada quando o valor de cálculo do esforço resistente de cada um dos elementos da estrutura é maior ou igual ao valor de cálculo dos respectivos esforços solicitantes. No domínio das temperaturas, essa verificação significa que a temperatura crítica do elemento estrutural deve ser superior ou igual à temperatura atuante.

Conforme a IT 07 (CBMMG, 2019), a compartimentação horizontal e compartimentação vertical, atendendo ao previsto no Regulamento de Segurança Contra Incêndio e Pânico nas edificações e áreas de risco no Estado de Minas Gerais. A compartimentação horizontal se destina a impedir a propagação de incêndio no pavimento de origem para outros ambientes no plano horizontal. A compartimentação vertical se destina a impedir a propagação de incêndio no sentido vertical, ou seja, entre pavimentos elevados consecutivos. Esta Instrução Técnica se aplica a todas as edificações onde são exigidas a compartimentação horizontal e vertical, conforme previsto nas tabelas do Regulamento de Segurança Contra Incêndio e Pânico nas edificações e áreas de risco no Estado de Minas Gerais, estabelecendo detalhamentos técnicos relativos à área de compartimentação.

Liberato e Souza (2015) afirmam que compartimentação vertical e horizontal é uma medida de proteção contra

incêndio que evita a propagação de fogo, fumaça ou gases de um pavimento para outro. Pode ser feita com concreto ou outro material resistente ao fogo, como a lã de rocha ou lã de vidro. Nos condomínios verticais é comum a existência de vãos que unem todos os pavimentos (*shafts*) com a finalidade de proteger instalações hidráulicas, elétricas e de telecomunicações. Sendo assim, é necessário que todos os *shafts* sejam providos dessa compartimentação que permite isolar um pavimento do outro.

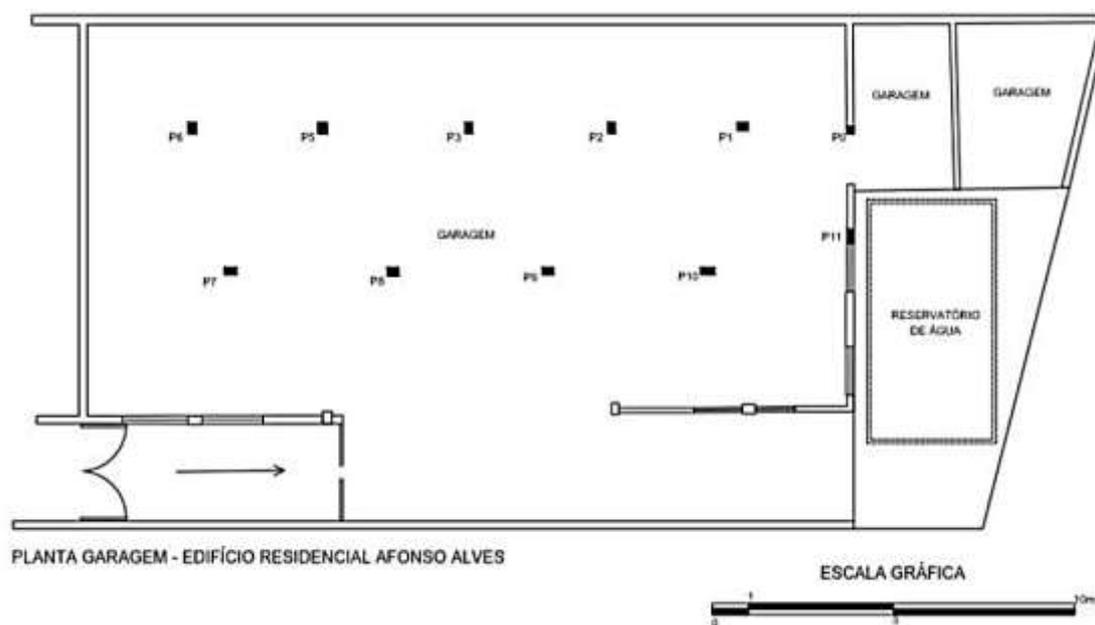
3. Estudo de caso

3.1 Descrição do edifício

O Edifício Residencial Afonso Alves, objeto deste estudo de caso, localiza-se em Barbacena, Minas Gerais, e possui seis pavimentos, sendo um de garagem, quatro de pavimentos domiciliares e um de cobertura. O acesso a cada um desses níveis se dá por meio de escadas e, para a garagem, por uma rampa.

Todos os seus elementos estruturais foram construídos em concreto armado e apresentam as seguintes dimensões: pilares com dimensões que variam entre 30x50 cm e 20x40 cm; as vigas longarinas e transversinas da estrutura têm seção variando de 15x30 cm a 20x40 cm; os pilares foram enumerados de P0 a P11, conforme a Figura 1.

Figura 1: Planta da garagem do edifício



Fonte: Reteng (2020).

A estrutura está localizada em um ambiente com Classe de Agressividade II (agressividade ambiental moderada), de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.

É importante destacar que o estudo analisou as áreas mais impactadas pelo incêndio no nível da garagem, local onde se iniciou o incêndio, mas não avaliou a estrutura da fundação e dos outros pavimentos menos atingidos.

3.2 Diagnóstico estrutural

No dia 15 de julho de 2020, ocorreu um incêndio no Edifício Residencial Afonso Alves, que danificou todas as estruturas de concreto armado. Diante de tais circunstâncias, a administração do edifício decidiu contratar uma empresa que atue com recuperação e reforço estrutural, impermeabilização, além de serviços de restauração de monumentos históricos. A empresa contratada foi a Reteng, especializada no tratamento das mais diversas e complexas patologias das estruturas de

concreto e aço. Neste ponto, é interessante ressaltar que os autores deste trabalho acompanharam todo o trabalho da perícia.

Para a realização das avaliações e elaboração dos diagnósticos estruturais, foram feitas inspeções visuais em todas as estruturas visíveis, ensaios destrutivos e não destrutivos, de campo e laboratório, dentro de uma amostragem representativa selecionada pela Reteng. Todo o processo é detalhado a seguir.

3.2.1 Inspeções visuais

As inspeções visuais detalhadas foram realizadas com objetivo de identificar, tipificar e cadastrar as anomalias evidenciadas. Várias manifestações patológicas foram identificadas, a saber: destacamentos de concreto e armaduras expostas em processo de corrosão inicial; delaminação das camadas superficiais do concreto; fissuração excessiva nos pontos mais atingidos pelo incêndio; camada de revestimento inexistente em alguns pontos

Além disso, uma indicação muito importante em estruturas de concreto armado submetida a altas temperaturas é a cor da superfície das estruturas. A cor identificada nas regiões mais atingidas pelo incêndio tem um tom de cinza-róseo e rosa, característico para temperaturas próximas de 300 °C. As regiões menos atingidas pelo incêndio estão com o tom cinza, característico do concreto. Segundo Rosso (1975 *apud* Reteng, 2020), a partir da temperatura de 300 °C o concreto começa a perder significativamente sua resistência mecânica. A Tabela 1 apresenta as cores e as características do concreto superaquecido de acordo com a temperatura.

Tabela 1: Características do concreto superaquecido.

Temperatura [°C]	Cor	Aspecto visual / Desempenho
< 250	Cinza	Perda de resistência pequena e irregular
285-300	Cinza-Roseo	Fissuração superficial, lascamento explosivo (vapor)
300	Rosa	Início de mudança de cor
50-400	-	Redução do módulo de deformação
535-550	Roxo	Fissuração profunda - friabilidade superficial
575	Vermelho pálido	Pipocamento dos grãos de quartzo
650	Cinza esbranquiçado	Perda das propriedades mecânicas
790-800	-	Lascamento do revestimento das armaduras, com exposição de
900	Amarelo alaranjado	até 25% da superfície das mesmas
1000	Amarelo claro	Superfície pulverulenta

Fonte: Reteng (2020).

3.2.2 Extração dos corpos de prova

Foram extraídos dois testemunhos de pilares diferentes da área mais atingida pelo incêndio, conforme se verifica na Figura 2 e na Tabela 2. As amostras foram submetidas a inspeções visuais, para avaliar a integridade e homogeneidade do concreto, além de rompimento para determinação da resistência à compressão axial, realizado pelo laboratório Coneresolo, e ensaios de carbonatação.

A partir da análise visual realizada nos testemunhos de concreto retirados, verificou-se um concreto compacto e homogêneo. A cor do concreto é um fator determinante na avaliação da temperatura na qual ele foi submetido e, a princípio, as altas temperaturas não atingiram de forma muito significativa o interior das peças de concreto armado.

Todas as unidades desses testemunhos foram submetidas ao ensaio de rompimento para obter os resultados da resistência à compressão do concreto da estrutura, os quais são explicitados na sequência deste trabalho.

Figura 2: Retirada do corpo de prova.



Fonte: Reteng (2020).

Tabela 2: Informações dos corpos de prova.

Nº CP	Estrutura	Identificação	Tamanho [mm]	Diâmetro [mm]	Data de extração	Inspeção visual
1	Pilar	P1	111	71,3	27/06/2019	-
2	Pilar	P2	111,5	71	27/06/2019	Aço

Fonte: Reteng (2020).

3.2.3 Medição da profundidade da carbonatação

Os testemunhos retirados foram avaliados e as frentes de carbonatação foram medidas através da evidência de solução de fenolftaleína. Foi realizada a comprovação das áreas carbonatadas por meio da aspersão de fenolftaleína, que age como um indicador de pH, sobre as superfícies dos corpos de prova, conforme se verifica na Figura 3.

Minutos após a aspersão da fenolftaleína, é possível constatar visualmente que as regiões mais alcalinas se apresentam com cor violeta, enquanto as áreas carbonatadas, menos alcalinas, permanecem incolor.

Um dos determinantes de qualidade do concreto é seu potencial alcalino. Quanto maior esse índice, mais eficácia esse concreto apresenta. Áreas com coloração violeta mostram áreas sem carbonatação, portanto, com maior qualidade. Áreas que não tiveram variação de cor são áreas carbonatadas e submetidas aos agentes agressivos que proporcionam a perda de alcalinidade.

Figura 3: (a) Corpo de prova do pilar P1 após aplicação da solução de fenolftaleína; (b) Corpo de prova do pilar P2 após aplicação da solução de fenolftaleína.



Fonte: Reteng (2020).

De maneira geral, a frente de carbonatação detectada nos ensaios ainda não atingiu o alinhamento principal das armaduras, indicando que as manifestações patológicas que apontam corrosão nas armaduras não estão relacionadas com a despassivação do aço devido à carbonatação.

Apesar disso, alguns pilares apresentaram média de cobertura baixo (através de análises visuais), com índices de 15 a 30 mm. Assim, algumas dessas estruturas já podem ter suas armaduras em processo de corrosão em função da manifestação patológica da carbonatação.

3.2.4 Ensaio de resistência à compressão

Os corpos de prova foram levados à prensa elétrica para serem rompidos à compressão axial. Antes de realizar o ensaio, os testemunhos foram preparados conforme especifica a norma brasileira ABNT NBR 7680:2015 – Concreto – Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto. Depois de preparados, os corpos de prova foram rompidos à compressão de acordo com o estabelecido pela norma ABNT NBR 5739:2007 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, conforme apresentado pela Figura 4. Os resultados dos ensaios são exibidos na Tabela 3.

A resistência média à compressão obtida nos ensaios foi de 8,85 MPa, sendo este um resultado preocupante, considerando que o concreto utilizado possuía resistência característica (f_{ck}) de aproximadamente 14 MPa. Em outras palavras, a perda de resistência à compressão média foi de 40% nos pilares mais atingidos pelo incêndio.

Esse fato corrobora a teoria de Cánovas (1988), que diz que quando o concreto atinge temperaturas entre 300 e 500 °C, o tom fica rosado e a perda de resistência gira em torno de 5 a 40%. A título de exemplificação, a Figura 5 apresenta um gráfico da variação da coloração e da resistência do concreto quando este é submetido a altas temperaturas.

Tabela 3: Resistência à compressão axial das amostras.

Nº CP	Estrutura	Identificação	Resistência [MPa]
1	Pilar	P1	10,4
2	Pilar	P2	7,3

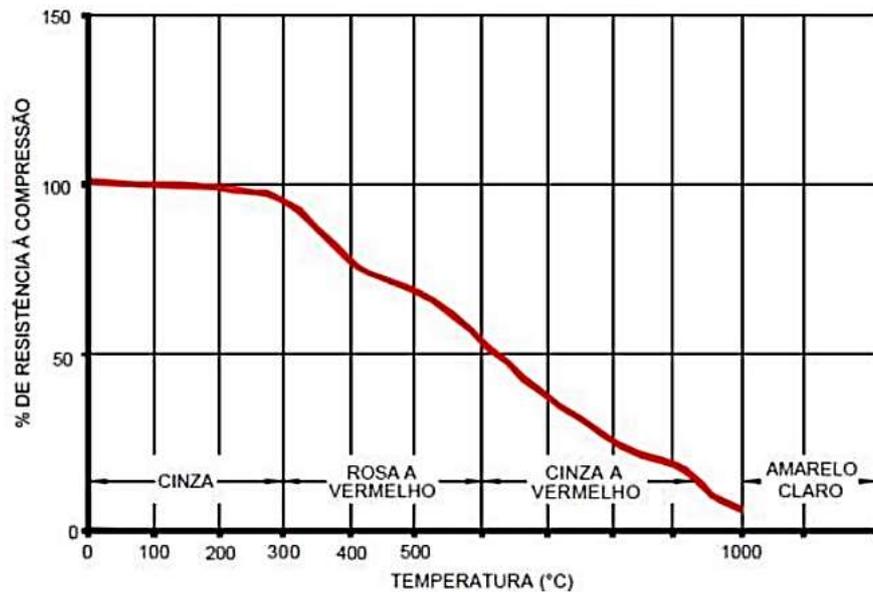
Fonte: Reteng (2020).

Figura 4: (a) Corpo de prova do P1 após o rompimento; (b) Corpo de prova do P2 após o rompimento.



Fonte: Reteng (2020).

Figura 5: Alteração na coloração e na resistência do concreto quando submetido a altas temperaturas.



Fonte: Cánovas (1988).

3.2.5 Ensaios de resistência por esclerometria

O ensaio de esclerometria é realizado in situ, com a utilização de um aparelho que, de forma simples e não destrutiva, fornece a resistência à compressão de elementos de concreto. Por se tratar de um ensaio de resistência superficial, os valores obtidos são apenas representativos de uma camada até 5 cm de profundidade. No entanto, o ensaio é útil para avaliar a homogeneidade do concreto. A Tabela 4 apresenta os resultados de todos os pilares.

Tabela 4: Resultados dos ensaios de resistência por esclerometria de todos os pilares.

Pilar	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Resistência [MPa]	30	38	34	24	40	30	44	38	42	42	42	32

Fonte: Reteng (2020).

Os resultados da esclerometria revelam a resistência da camada superficial do concreto e os seus resultados não podem ser considerados relevantes, pois eles estão extremamente discrepantes com a realidade. Isso ocorreu devido à perda de água superficial do concreto e um ganho substancial de resistência das camadas externas, provocado pelo incêndio. Dessa forma, estes resultados devem ser descartados e apenas a resistência do ensaio de compressão axial será considerado neste trabalho.

3.2.6 Ensaios de compressão e de dobramento em barras de aço

O ensaio de tração e dobramento da barra de aço é uma ferramenta importante para verificar o comportamento mecânico das barras, bem como perda de massa linear nominal. A Figura 6 apresenta um operário extraíndo um corpo de prova de aço, que foi usado no ensaio realizado pela Concesolo. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 5.

Figura 6: Extração do corpo de prova de aço.



Fonte: Reteng (2020).

Tabela 5: Relação dos resultados do ensaio de tração e dobramento da barra de aço.

Nº CP	Posição	Comprimento do CP [mm]	$\varnothing_{\text{real}}$ [mm]	Limite de escoamento [MPa]	Limite de Ruptura [MPa]	F_{st}/F_{yk}	Dobramento
1	Entre P1/P2	510	8,16	200	213	1,06	Normal

Fonte: Reteng (2020).

Os resultados do ensaio de tração e dobramento da barra de aço foram pouco conclusivos, pois a barra de aço CA-50 deveria fornecer um limite de escoamento na ordem de 500 MPa, no entanto, no ensaio ele apresentou apenas 200 MPa. Essa diferença dificilmente seria causada pelo incêndio, conforme se comprova a partir da Tabela 6, que apresenta as propriedades resistentes do aço em questão.

Além disso, a barra apresentava um peso linear adequado de 0,400 kg/m, típico de barras de CA-50 com bitola de 8,00 mm, ou seja, não houve perda de seção de aço. Além disso, a barra estava no processo inicial de corrosão, o que também não justifica a perda de resistência.

Os resultados do limite de escoamento (F_{st}) e limite de ruptura (F_{yk}) da barra de aço ficaram abaixo do esperado, mas a relação entre eles permaneceu a mesma. A manutenção desse índice (F_{st}/F_{yk}) em 1,06 é um importante dado para avaliar a qualidade de uma peça metálica.

Por fim, o resultado de dobramento da barra foi satisfatório, o que significa que a barra foi dobrada em um pino com 32 mm de diâmetro, sem ocasionar pequenas trincas e fissuras, além da ruptura do material.

Tabela 6: Propriedades resistentes apresentadas pelo aço CA-50.

Temperatura [°C]	Tempo de aquecimento [min]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	E_s [GPa]
20	0	546,6	649,6	200,51
	60	542,6	646,5	197,66
200	120	542,1	646,2	197,42
	60	542,1	645,9	187,02
400	120	552,7	649,1	172,34
	60	508,1	589,1	159,63
600	120	500,8	582,9	153,87
	60	317,7	476,1	127,68
800	120	303,5	473,7	113,72
	60	258,7	428,3	108,94
Desvio padrão		121,1	86,9	35,2

Fonte: Ibrahim (2018).

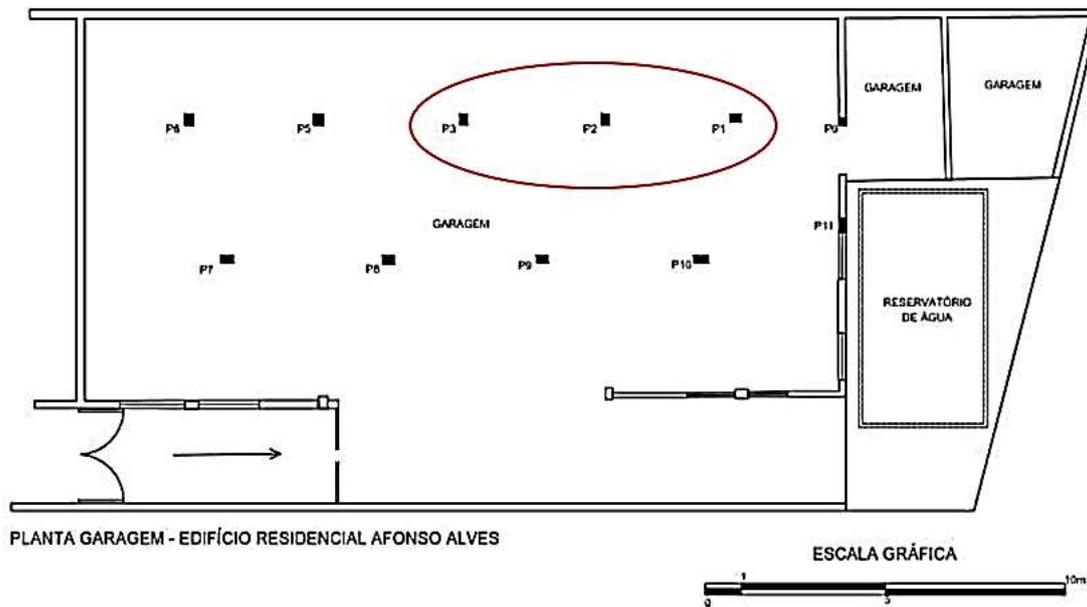
3.3 Medidas de reforço e recuperação estrutural

A partir das inspeções de campo e dos ensaios destrutivos e não destrutivos, pôde-se identificar diversas patologias que comprometem a estabilidade e durabilidade das estruturas de concreto armado, com índices abaixo das recomendações atuais da norma técnica vigente, ABNT NBR 6118:2014. Dessa forma, recomenda-se o tratamento localizado das manifestações patológicas com reforço das estruturas que foram atingidas de forma mais intensa pelo incêndio, sobretudo os pilares P1, P2 e P3, e todas as vigas que estão próximas desses locais, conforme apresentado na Figura 7. As lajes não precisam ser reforçadas, já que visualmente não apresentaram problemas.

Além disso, constatou-se que alguns pontos que não estavam no epicentro do incêndio também apresentaram patologias estruturais, tais como deslocamento do concreto e excesso de fissuração. Estes problemas provavelmente já existiam, no entanto foram intensificados devido às altas temperaturas.

As fissuras encontradas devem ser tratadas com a injeção de epóxi, pois este material possui boa resistência à tração e à compressão, além de possuir ótima penetração em fissuras e endurecimento rápido.

Figura 7: Planta do edifício com o detalhe da área mais atingida



Fonte: Reteng (2020). Adaptada pelos autores.

Em função da deficiência de espessura das camadas de cobrimento das armaduras, observada em algumas áreas da estrutura do edifício, propõe-se também que todas as estruturas da edificação sejam protegidas através de pintura cristalizante, que, além da proteção superficial, contribui para um pequeno aumento da resistência do concreto. Este serviço não elimina a necessidade do reforço estrutural, mas visa um tratamento para prevenir o surgimento de novas patologias.

Portanto, as intervenções de reforço e recuperação das estruturas do Edifício Afonso Alves devem ser realizadas o quanto antes, a fim de evitar problemas com a estabilidade e com a segurança das estruturas e das pessoas.

4. Considerações Finais

A partir deste trabalho, pode-se concluir que a segurança na prevenção e combate a incêndio não pode ser totalmente atingida, pois ela somente visa diminuir os riscos de colapso estrutural. Porém as várias medidas de prevenção, quando reunidas em um grupo final, resultam em uma segurança considerável tanto para a edificação quanto para os seus ocupantes.

Em uma análise visual, foram detectadas várias patologias no Edifício Residencial Afonso Alves, objeto de estudo deste trabalho, sendo algumas causadas pelo incêndio, como: destacamentos de concreto, armaduras expostas em processo de corrosão inicial e delaminação das camadas superficiais do concreto. Outras patologias provavelmente já existiam, mas podem ter sido intensificadas pela alta temperatura na região mais atingida pelo incêndio, como fissuração excessiva e camada de cobrimento inexistente em alguns pontos.

O laudo técnico emitido pela empresa contratada para realizar a perícia do sinistro apontou algumas considerações importantes. Primeiro, o início da corrosão da armadura foi ocasionado pelo deslocamento explosivo do concreto, que levou à exposição da armadura. Segundo, os ensaios demonstraram que o concreto teve uma perda considerável (cerca de 40%) na resistência à compressão devido ao incêndio, apontando para a necessidade de recuperação e reforço. Terceiro, o cobrimento das armaduras era insuficiente, não atendendo às exigências da norma brasileira ABNT NBR 6118:2014.

Assim, apesar de apresentar boas propriedades mecânicas, como ter elevada resistência ao fogo, não exalar gases tóxicos, ter baixa condutividade térmica e quando exposto a elevadas temperaturas sofrer uma diminuição na sua capacidade estrutural, o concreto pode precisar de medidas de recuperação e reforço quando utilizado em elementos estruturais de uma

edificação. Neste ponto, deve-se atentar para o fato de que mesmo uma exposição por um período considerável não é suficiente para levar a estrutura ao colapso, justificando a boa resistência do concreto ao fogo.

Por fim, destaca-se que, na prevenção e combate a incêndio em edificações, a atuação de profissionais de Engenharia e Arquitetura é de extrema importância no dimensionamento dos sistemas, contudo é preciso que haja comprometimento dos órgãos de fiscalização e regulamentação, e, sobretudo, interesse e contribuição da população para a preservação de vidas.

Para continuidade de estudos relacionados ao comportamento do concreto armado quando submetido a elevadas temperaturas, sugerem-se pesquisas experimentais de caracterização de argamassas e concretos de resistência normal e de alta resistência considerando a utilização de fibras de polipropileno e/ou de nano tubos de carbono à mistura, com dosagens variadas, visando analisar sua empregabilidade na recuperação e reforço de estruturas.

Referências

- ABNT. (2007). NBR. 5739. Concreto: Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- ABNT. (2010). NBR 9575. Impermeabilização: Seleção e projeto. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- ABNT. (2013). NBR 15575. Desempenho de edificações habitacionais. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- ABNT. (2014). NBR. 6118. Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- ABNT. (2015). NBR. 7680. Concreto: Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão axial. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- Antonino, F. L. (2019). Trincas em alvenarias de vedação ou convencional.
- Arivabene, A. C. (2015). Patologias em estruturas de concreto armado: Estudo de caso. *Revista Especialize On-line IPOG, Goiânia*, 3(10), 1-22.
- Azevedo, M. S. D., Murakami, A., & Silva, V. P. (2007). Segurança das estruturas de aço externas a edificações em situação de incêndio. *Rem: Revista Escola de Minas*, 60, 295-301.
- Bastos, P. S. D. S. (2019). Fundamentos do Concreto Armado. 2019. Estruturas de Concreto I, Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia, da Universidade Estadual Paulista–UNESP. *Campus de Bauru*.
- Bayon, R. (1978). *La protección contra incendios en la construcción*. Reverte.
- Bazant, Z. P., Kaplan, M. F., & Bazant, Z. P. (1996). Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models.
- Beleza, E. (1998). Estacionamento de viaturas em locais de sinistro, uma estratégia ou uma tática.
- Brentano, T. (2004). *Instalações hidráulicas de combate a incêndios nas edificações*. EDIPUCRS.
- Brentano, Telmo. (2007). A proteção contra incêndios no projeto de edificações. *T Edições*
- Cánovas, M. F. (1988). *Patologia e terapia do concreto armado*. Pini.
- Carasek, H., Cascudo, O., & Scartezini, L. M. (2001). Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. *Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, 4(2001), 43-67.
- CBMGO. (2014). Norma Técnica 02: Conceitos básicos de segurança contra incêndio. Corpo de Bombeiros Militar de Goiás (CBMGO).
- CBMMG. (2005). Instrução Técnica 05: Separação entre Edificações (isolamento de risco). Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG).
- CBMMG. (2014). Instrução Técnica 04: Acesso de viaturas nas edificações e áreas de risco. Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG).
- CBMMG. (2018). Instrução Técnica 06: Acesso de viatura na edificação e áreas de risco. Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG).
- CBMMG. (2019). Instrução Técnica 07: Separação entre edificações (isolamento de risco). Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG).
- CBMSP. (2018). Instrução Técnica 02: Conceitos Básicos de Segurança Contra Incêndio. Corpo de Bombeiros Militar de São Paulo (CBMSP).
- Clifton, J. R. (1993). Predicting the service life of concrete. *Materials Journal*, 90(6), 611-617.
- Costa, C. N., Figueiredo, A. D. D., & Silva, V. P. (2002). Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas. *Seminário Internacional NUTAU*.
- Dal Molin, D. C. C. (1988). Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul.

- El-Hawary, M. M., & Hamoush, S. A. (1996). Bond shear modulus of reinforced concrete at high temperatures. *Engineering Fracture Mechanics*, 55(6), 991-999.
- Ferreira, S. G. (1998). Ação do incêndio nas estruturas de aço—consequências e recuperação. *Simpósio Nacional de Arquitetura e Proteção Contra Incêndios. Anais. EPUSP. São Paulo*.
- Freiberger, L. G. (2016). Cobrimento de armaduras em estruturas de concreto armado: análise comparativa entre os valores especificados em projeto e os executados em obras no município de Santa Rosa.
- Freire, K. R. R. (2005). Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto.
- Gomes, T. (2014). Projeto de prevenção e combate a incêndio. *Santa Maria*.
- Gonçalves, E. A. B. (2015). Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações. *Rio de Janeiro: UFRJ*.
- Helene, P. D. L. (1993). Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. 231, 14.
- Hertz, K. D. (2005). Concrete strength for fire safety design. *Magazine of concrete research*, 57(8), 445-453.
- Kakae, N., Miyamoto, K., Momma, T., Sawada, S., Kumagai, H., Ohga, Y., ... & Abiru, T. (2017). Physical and thermal properties of concrete subjected to high temperature. *Journal of advanced concrete technology*, 15(6), 190-212.
- Kanema, M., De Moraes, M. V. G., Noumowe, A., Gallias, J. L., & Cabrillac, R. (2007). Experimental and numerical studies of thermo-hydrous transfers in concrete exposed to high temperature. *Heat and Mass Transfer*, 44(2), 149-164.
- Laske, A. C. (2017). *Análise do comportamento de aços para estruturas de concreto armado submetidos a situação de incêndio* (Bachelor's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná).
- Liberato, D. J. D. M., & Souza, M. D. F. D. (2015). Subsídios educativos para prevenção e combate a incêndio e pânico.
- Lin, W. M., Lin, T. D., & Powers-Couche, L. J. (1996). Microstructures of fire-damaged concrete. *Materials Journal*, 93(3), 199-205.
- Medeiros, M. H. F., de Oliveira Andrade, J. J., & do Lago Helene, P. R. (2011). Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. *Concreto: ciência e tecnologia*.
- Minami, K., Tazawa, E. I., & Teranishi, S. (1990). Effect of microscopic thermal stress on mechanical properties of concrete subjected to high temperature. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 1990(420), 173-180.
- Oliveira, A. B. (2014). Cobrimento de Armaduras de Estruturas de Concreto Armado: levantamento de critérios adotados na utilização de espaçadores.
- Piancastelli, É. M. (1998). Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto Armado. *Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais*.
- Purkiss, J. A. (1996). *Fire Safety Engineering Design of Structures*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Reteng Engenharia Especiais. (2020). Relatório de Inspeção Predial – RIP.RTG.001-20 R0 – CONTRATO 028-20 R2.
- Rosso, T. (1975). Incêndios e arquitetura. *FAUUSP*.
- Silva, O. S. P. D. (2012). Cobrimento de armaduras em estruturas de concreto armado: análise comparativa entre o valor especificado em projeto e o em execução em obras na cidade de Porto Alegre.
- Silva, V., & Vargas, M. (2003). Resistência ao Fogo das Estruturas de Aço. *Instituto Brasileiro de Siderurgia-CBCA*,
- Souza, V. C. M., & Ripper, T. (1998). *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. Pini.
- Takata, L. T. (2009). Aspectos executivos e a qualidade de estruturas em concreto armado: estudo de caso.
- Thomaz, E. (1989). *Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação*. Pini.
- Velasco, R. V. (2002). Concreto de alto desempenho reforçado com fibras de polipropileno e sisal submetido a altas temperaturas. *Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro*.