

Revisão sistemática sobre reabilitação de vigas de concreto armado após incêndio reforçadas utilizando laminados de CFRP

Systematic review about post fire damaged concrete beams reinforced usign CFRP laminates

*Kézia Brasilino de Souza(1); Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira(2);
Leonardo Medeiros da Costa(3)*

1 Universidade Federal de Pernambuco. Doutoranda PPGEC em Engenharia Civil da UFPE.

E-mail: kezia.brasilino@ufpe.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3570-7201>

2 Universidade Federal de Pernambuco. Professor Doutor de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFPE.

E-mail: tiago.poliveira@ufpe.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4861-4944>

3. Universidade Federal da Paraíba. Professor Doutor de Graduação em Engenharia Civil – UFPB.

E-mail: leonardo.costa@ct.ufpb.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3271-680X>

Revista de Arquitetura IMED, Passo Fundo, vol. 14, n. 2, p. 90-112, julho-dezembro, 2025 - ISSN 2318-1109

DOI: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2025.v14i2.5210>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Resumo

Vigas de concreto armado necessitam de reabilitação pós-incêndio para o funcionamento pleno de suas funcionalidades iniciais estabelecidas na fase de concepção do projeto. O objetivo deste artigo é identificar as principais respostas do desempenho mecânico de vigas de concreto armado aquecidas, sob uma curva de incêndio, resfriadas e depois reforçadas com laminados de polímero com fibra de carbono. Foi realizada uma revisão sistemática de literatura acerca do tema, por meio da metodologia *Transparent Reporting of Systematic Reviews and Meta-Analyses*. Foram encontrados 1978 estudos, desses, somente 11 artigos elegíveis. O trabalho de Jadooe et al. (2018a) consta a recuperação da capacidade de carga inicial (115%), para vigas aquecidas até 800 °C e depois reforçadas à flexão. Costa et al. (2023) afirmam a restauração da capacidade de carga inicial da peça estrutural até o dano de mais de 1000 °C, para vigas aquecidas e depois reforçadas ao cisalhamento. Em ambos os cenários, não houve a recuperação da capacidade de rigidez. Conclui-se que o dano da temperatura, a técnica de reforço e a taxa de reforço, nessa ordem, são os que mais influenciam nos resultados do desempenho das vigas. Portanto, observou-se que o reforço aumenta a capacidade de carga das peças após a ação do fogo.

Palavras-chave: revisão sistemática, vigas de concreto armado, após incêndio, laminados de fibra de carbono.

Abstract

Reinforced concrete beams require post-fire rehabilitation to fully restore their initial functionality as established in the project design phase. The objective of this article is to identify the main responses of the mechanical performance of heated reinforced concrete beams under a fire curve, cooled and then reinforced with carbon fiber polymer laminates. A systematic review of the literature on the subject was conducted using the Transparent Reporting of Systematic Reviews and Meta-Analyses methodology. A total of 1,978 studies were found, of which only 11 articles were eligible. The work of Jadooe et al. (2018a) reports the recovery of the initial load capacity (115%) for beams heated to 800 °C and then reinforced against bending. Costa et al. (2023) affirm the restoration of the initial load capacity of the structural member up to damage of more than 1000 °C for beams heated and then reinforced against shear. In both scenarios, there was no recovery of stiffness capacity. It is concluded that temperature damage, reinforcement technique, and reinforcement rate, in that order, are the factors that most influence the performance results of the beams. Therefore, it was observed that reinforcement increases the load capacity of the parts after exposure to fire.

Keywords: systematic review, post fire, reinforced concrete beams, Carbon Fiber Reinforced Polymer.

1 Introdução

A exposição a altas temperaturas geradas em incêndios causa danos significativos a estruturas de concreto armado. A exposição ao calor provoca alterações físicas e químicas no concreto e no aço, resultando na perda de resistência e na redução da segurança. A evaporação da água presente nos poros do concreto pode ocasionar microfissuras e até o lascamentos (*spalling*) do concreto (Dias, 2020). Desse modo, as

armaduras do aço ficam expostas e reduzindo sua proteção. Em temperaturas a 300 °C a disparidade nos coeficientes de expansão térmica entre o agregado graúdo e a matriz de argamassa de cimento pode induzir o surgimento de fissuras na interface entre esses materiais, enfraquecendo a matriz do cimento; a 500 °C a diferença na deformação térmica entre o agregado e a argamassa de cimento é mais intensa, ocasionado a expansão de fissuras; em 700 °C as fissuras começam a se expandir dentro do agregado à medida que as temperaturas aumentam (Li, 1991).

Com relação ao aço, seu aquecimento acima de 300 °C causa perdas significativas em sua resistência e rigidez, em 500°C a resistência de tração do aço diminui abaixo de seu limite (Kültür, 2022; Özberk, 2010). Em conjunto, essas alterações no concreto e no aço reduzem a capacidade de carga residual de elementos estruturais, como vigas, comprometendo o desempenho e a segurança da edificação (Demir et al., 2020). Vigas de concreto armado (CA) danificadas pelo fogo têm a capacidade de carga residual reduzida com a elevação da temperatura (Irshidat e Al-Saleh, 2017; Esfahani et al., 2021) e com o aumento da exposição ao incêndio (Liu et al., 2023). Por essa razão, é fundamental a implementação de soluções de reforço após um incêndio para recuperar a capacidade estrutural e restaurar a segurança da construção.

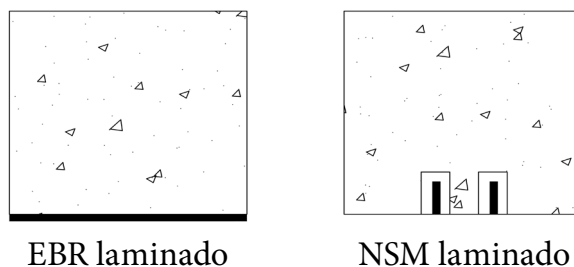
Para pontuar as intervenções aplicadas a elementos de concreto armado, as definições dos termos adotados, descritos neste trabalho, estão de acordo com a norma americana *American Concrete Institute* (ACI 562-19, 2019). Sendo assim, ‘reparo’ refere-se à reconstrução ou renovação total do concreto ou de sua fração, referente a uma estrutura existente, com o objetivo de manutenção ou correção de deterioração. ‘Reforço’ trata do processo com a finalidade de elevar a capacidade de carga de uma estrutura existente ou parte dela. ‘Reabilitação’ se refere às definições de reparo e reforço, com a finalidade de restaurar as características originais de carga do elemento. Por meio da compreensão dessas definições, é possível dar prosseguimento à discussão desenvolvida nesta pesquisa.

Recentemente, os compósitos de polímero reforçado com fibra de carbono (*Carbon Fiber Reinforced Polymer - CFRP*) têm se consolidado como um dos materiais e sistemas de reforço estrutural mais utilizados (Barris et al., 2020). Isso ocorre devido à sua alta relação resistência-peso, resistência à corrosão e fácil aplicação, sendo vantajoso e predominante para restaurar estruturas de concreto armado (CA) para condições normais (Kadhim et al., 2019), (Hawileh et al., 2019), além de contribuir para a recuperação do desempenho mecânico de vigas de CA após incêndio, reforçadas com CFRP, como na melhoria do desempenho da capacidade de carga do elemento estrutural (Murad e Abu-Alhaj, 2021), (Nguyen e Cao, 2023), (Kim, 2019). A comercialização do CFRP normalmente é feita em forma de laminados, cordas, barras ou mantas.

Na colagem do CFRP em superfícies do concreto, geralmente utiliza-se duas técnicas, *Externally Bonded Reinforcement* – EBR e *Near-Surface Mounted* – NSM.

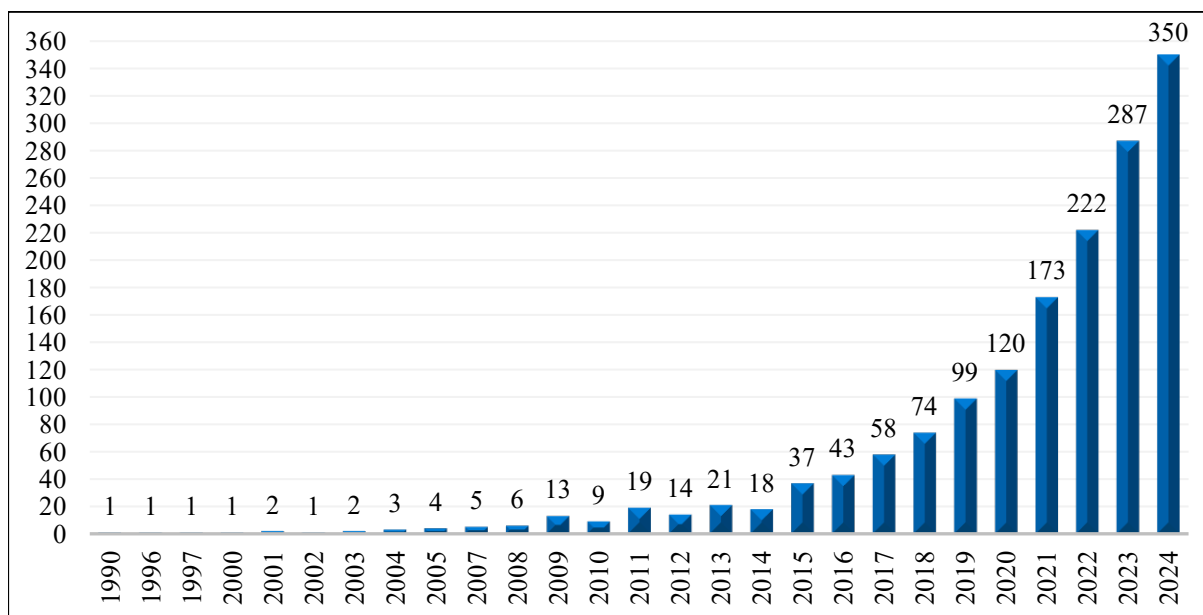
No método EBR, o reforço é ligado externamente (Figura 1). Segundo Mehdi et al. (2025), seu processo consiste em preparar a superfície em sequência a adesão do reforço (geralmente com adesivo epóxi ou argamassa cimentícia). Na técnica NSM, é realizada a ranhura do concreto a fim de inserir tiras de FRP dentro da cobertura de concreto. Consoante Jaddoe et al. (2017a), inicialmente são realizados cortes longitudinais na estrutura, seguidos de limpeza na região do corte. Posteriormente, aplica-se o adesivo (geralmente epóxi ou argamassa cimentícia) nas ranhuras e logo após a inserção do reforço, perpendicular ao corte. Por fim, a superfície é nivelada e reparada, normalmente com o mesmo adesivo epóxi ou argamassa a base de cimento.

Figura 1. Técnicas de reparo com CFRP para vigas de concreto armado



O desempenho da capacidade de carga está relacionado com a aderência dos materiais contidos no reparo com FRP. A adesão entre materiais é influenciada, dependendo do carregamento (Emara et al., 2018), escolha do tipo de adesivo (Mohammed et al., 2017), profundidade do sulco para o NSM CFRP (Lv et al., 2023), resistência do concreto (Dong-Er et al., 2019; Wang e Cheng, 2021), tipo de técnica de aplicação (Siddika et al., 2020), dimensões e tipos de NSM CFRP (Khshain et al., 2015), espaçamento entre laminados (Rashid et al., 2008), cobrimento do concreto (Zhang et al., 2018), adição de armadura de aço no concreto (Haddad e Al-Rabadi, 2021).

Por meio da análise bibliométrica da seção seguinte, observa-se um crescimento exponencial sobre a reabilitação de estruturas de concreto. No entanto, ao realizar a revisão sistemática, observa-se que ainda existe uma escassez de trabalhos sobre estruturas de CA pós-incêndio e posteriormente reabilitadas com laminados de CFRP. Embora seja possível obter a determinação da resistência das vigas de CA por meio de ensaios mecânicos e formulações (Costa et al., 2021; Costa et al., 2022), o presente trabalho restringe-se apenas a artigos de estudos experimentais. Dessa forma, esta revisão sistemática tem como objetivo identificar e analisar os parâmetros-chave utilizados para avaliar o desempenho da capacidade de carga de vigas de concreto armado (CA) que foram expostas a altas temperaturas (simuladas por curvas de incêndio) e, posteriormente, reforçadas com laminados de CFRP, sintetizar as principais descobertas e os resultados experimentais, destacando as metodologias empregadas, os tipos de curva de incêndio utilizados, as configurações de reforço e avaliar a eficácia do reforço CFRP com o impacto de diferentes variáveis, como a temperatura de exposição, extensão do dano, quantidade de reforço.

Figura 2. Distribuição dos artigos por ano localizados na análise bibliométrica

2 Método

Foi realizada uma análise bibliométrica com buscas nas bases de dados *Engineering Village*, Portal CAPES, *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*, visando encontrar artigos de alto impacto, sobre vigas de concreto reforçadas com laminados de CFRP, depois de altas temperaturas (simulando um incêndio). Dessa maneira, para as buscas, em cada portal utilizaram-se de palavras-chave: “concrete structures” AND “post fire” OR “heat-damaged” AND “beams” AND “CFRP”. Sendo o termo “AND” determina que os termos separados devem constar no título e/ou no resumo e/ou nas palavras-chave do artigo. O operador “OR”, determina que ao menos um dos termos separados por ele deve estar no título e/ou no resumo e/ou nas palavras-chave do artigo. A seleção foi realizada com objetivo de abranger artigos a partir do ano de 1990 até novembro de 2024 (Figura 2). Posteriormente, com os artigos encontrados, foram aplicados critérios de elegibilidade, seleção e exclusão. Os artigos elegíveis são aqueles que tratam da temática de vigas de CA reforçadas com laminados de CFRP após incêndio, após elevadas temperaturas, ou pós-danificadas pelo calor ou fogo.

Com o intuito de construir uma revisão sistemática da literatura (RSL), foram elaborados os parâmetros dos protocolos definidos para a pesquisa. Por consequência, foram estabelecidos critérios de inclusão, exclusão e qualidade acerca da questão norteadora. A seleção e classificação dos artigos seguem no Quadro 1.

Quadro 1. Parâmetros do Protocolo definidos para a pesquisa

Parâmetros	
Questão principal	Qual comportamento das vigas de concreto armado após incêndio reforçado com laminado de CFRP? Quais os critérios avaliados?
String de buscas	<i>Concrete structures AND post fire OR heat-damaged AND beams AND CFRP</i>
Base de dados	<i>Engineering Village, Portal Capes, Science Direct, Scopus e Web of Science</i>
Critérios de inclusão (I) e exclusão (E)	(I) NSM e EBR (E1) Duplicatas (E2) Não for experimental (E3) Não for viga de concreto armado (E4) Não for laminado de CFRP (E5) Não for pós-incêndio
Critérios de qualidade (Q)	(Q) Trabalho alinhado determinações da RSL (Q) Metodologia adequada

A triagem dos artigos foi seguida de três etapas, consoante a metodologia PRISMA, do inglês *Transparent Reporting of Systematic Reviews and Meta-Analyses*, detalhada na Figura 3 (Page et al., 2021), levando em consideração os Critérios de Exclusão e Inclusão do Quadro 1. A primeira etapa, chamada de Identificação, teve como objetivo a exclusão das duplicatas. Na etapa de triagem, foi realizada uma seleção, começando pela exclusão com a leitura apenas dos títulos. Em seguida, dos artigos restantes, a exclusão foi feita após a leitura dos resumos. Por fim, dos artigos que permaneceram, a exclusão ocorreu após a leitura na íntegra. Desse modo, restaram somente os artigos tratados na última etapa, denominada Inclusão, ou seja, os artigos elegíveis. Dos trabalhos elegíveis, foram localizados escritos por autores de diferentes países: Jordânia, Estados Unidos, Austrália, Iraque, Brasil e Tailândia (Figura 4).

De modo a tornar a revisão sistemática mais eficiente, na etapa da triagem, utilizou-se a ferramenta Rayyan. Rayyan é uma ferramenta online, que auxilia o processo de análise e seleção de artigos. Sendo assim, foram levados em consideração os parâmetros do Quadro 1. Dessa maneira, foram incluídas palavras-chave de inclusão como: “NSM”, “beams”, “CFRP”, “fiber-reinforced carbon”, “strips”, “laminated”, “FRP”. Ademais, inseridas palavras-chave de exclusão, como: “columns”, “numerical”, “review”, “overview”, “slabs”, “GFRP”, “systematic”. Os conceitos-chave eram enfatizados, no título ou resumo, por meio da cor de realce. As palavras de inclusão eram destacadas com a cor “verde”, enquanto as palavras de exclusão com a cor “vermelha”.

Figura 3. Fluxograma do protocolo de busca.

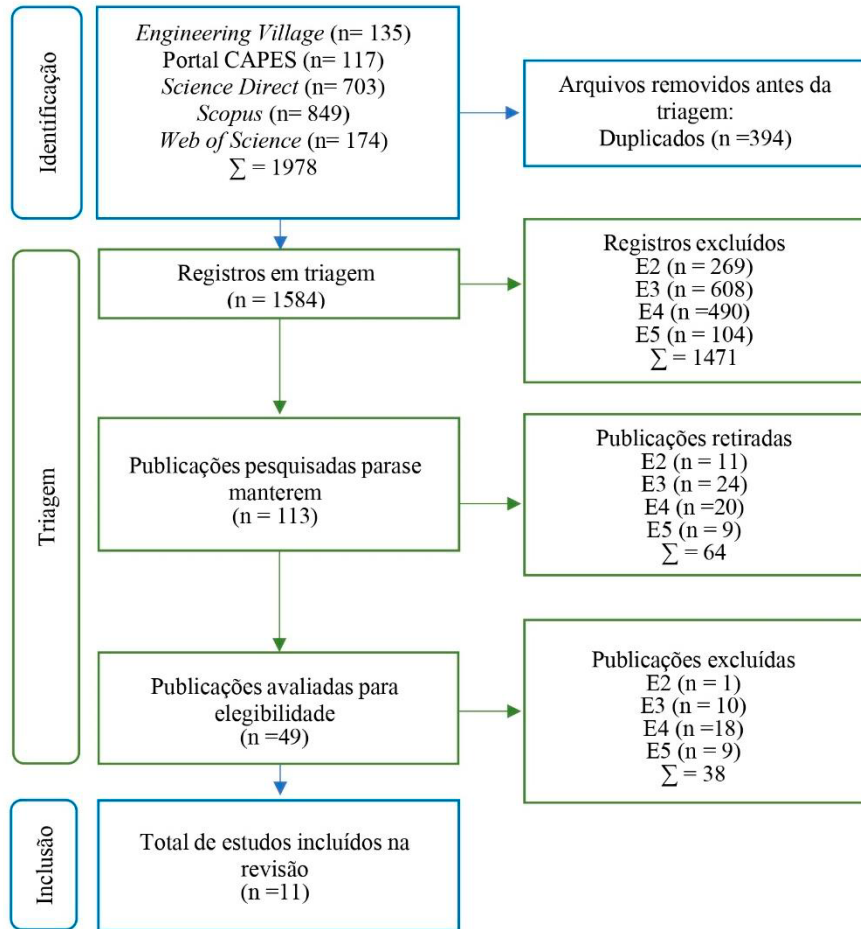
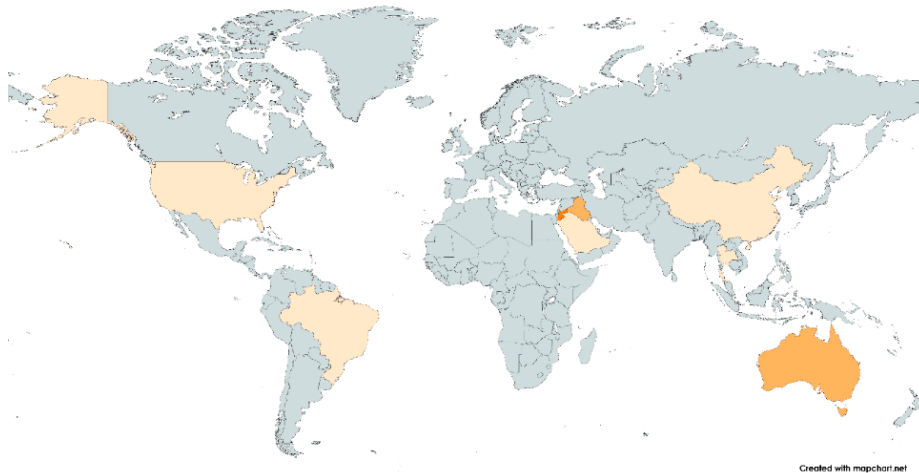


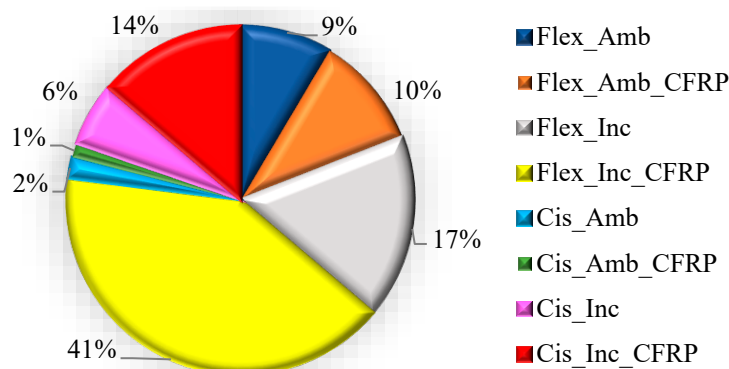
Figura 4. Distribuição dos artigos por países.



Esta revisão sistemática analisou 11 publicações elegíveis, que abordaram um total de 152 vigas de CA, sendo 117 para avaliação do comportamento à flexão e 35 para avaliação ao cortante. No Quadro 2 é possível notar os artigos analisados, organizados de maneira crescente, conforme o grau de relevância (com mais citações). Ademais, é possível observar as demais informações, como: quantidade de vigas estudadas em cada artigo, tipo de reforço utilizado, regime de aquecimento, tipo de ensaio mecânico.

As siglas da Figura 5, correspondem: Flex_Amb, vigas de CA cuja falha foi por flexão em temperatura ambiente; Flex_Amb_CFRP, vigas de CA reforçadas à flexão em temperatura ambiente; Flex_Inc, vigas de CA após incêndio e ruptura à flexão; Flex_Inc_CFRP, vigas de CA reforçadas à flexão, após incêndio; Cis_Amb, vigas de CA cuja falha foi por cisalhamento em temperatura ambiente; Cis_Amb_CFRP, vigas de CA reforçadas ao cisalhamento, em temperatura ambiente; Cis_Inc, vigas de CA após incêndio e ruptura ao cisalhamento; Cis_Inc_CFRP, vigas de CA reforçadas ao cisalhamento, depois do incêndio.

Figura 5. Percentual da distribuição de vigas trabalhadas



3 Estado da arte

3.1 Jadooe et al. (2017a)

Realizaram um programa experimental de oito vigas de CA (140 mm × 260 mm × 2700 mm), superdimensionadas ao cisalhamento, aquecidas sob curva de incêndio padrão ISO-834 (600 e 700 °C), por duas horas. A exposição prolongada dessas temperaturas causa degradação significativa no concreto, por meio da decomposição da pasta de cimento e a perda considerável da rigidez da armadura de aço. Após as vigas resfriadas, foram reforçadas à flexão com laminados de CFRP, ou seja, reforçada na região inferior da viga. O CFRP com largura de 20 mm e altura adequada para a ranhura de 25 mm de profundidade, utilizando a Técnica NSM, com uso de adesivo à base de cimento e epóxi. Todas as vigas foram ensaiadas à flexão com teste de carga de quatro pontos.

Os resultados dos ensaios de flexão demonstraram a eficácia do reforço. As vigas reparadas com adesivo epóxi recuperaram até 118% da capacidade de carga original, enquanto as reparadas com adesivo à base de cimento alcançaram 105%. A recuperação superior do adesivo epóxi é atribuída à sua alta resistência e adesão, que se traduzem em uma transferência de tensões mais eficiente entre o laminado de CFRP e o concreto. No entanto, o resultado com o adesivo à base de cimento, que também superou a

capacidade original da viga, indica que esta é uma alternativa viável. Com relação a rigidez, nenhum cenário conseguiu recuperar.

3.2 Haddad e Almomani (2017)

Realizaram estudo experimental com 20 vigas de CA ($150 \times 250 \times 1400$ mm). As vigas foram expostas às temperaturas de 600°C , por duas horas no forno elétrico, uma escolha de temperatura crucial devido a perda das propriedades mecânicas do concreto e do aço. Depois de resfriadas e posteriormente reforçadas à flexão com tiras de CFRP ($15 \times 2,5$ mm), por meio da técnica NSM, as vigas foram ensaiadas por meio de um teste de carga de quatro pontos. O regime de aquecimento adotado foi lento e não seguiu nenhuma curva de incêndio padrão.

As diferentes configurações de tiras e comprimentos de embutimento proporcionaram maior benefício de reabilitação. As vigas, após o incêndio, reparadas com duas tiras de NSM CFRP, com comprimentos incorporados de 150, 250 e 450 mm, atingiram a capacidade de carga máxima de 68%, 83% e 100%, e rigidez de 61%, 63% e 67%, respectivamente, em relação à viga de controle em temperatura ambiente. Desse modo, é possível concluir que é benéfico o reforço com NSM CFRP, pois recupera a capacidade de carga, quando reforçadas com tiras embutidas com comprimento de 450 mm. No entanto, a rigidez não foi recuperada para nenhum dos cenários.

3.3 Haddad Almasaeid (2016)

Tratam da recuperação de 20 vigas de CA ($150 \times 250 \times 1400$ mm) submetidas ao dano de diferentes temperaturas (200 , 500 e 600°C) por duas horas, com isso, permitindo uma análise comparativa dos níveis de dano. As temperaturas atingidas são críticas para a degradação do concreto e do aço. A 200°C , o dano é primariamente superficial, relacionado à evaporação da água livre. A 500°C , a matriz do cimento começa a sofrer uma degradação significativa, enquanto a 600°C , o concreto e, especialmente, a armadura de aço perdem uma parcela substancial de sua resistência e rigidez. Após as vigas resfriadas lentamente, foram reforçadas ao cisalhamento com laminados NSM de CFRP ($15 \times 2,5$ mm), com diferentes espaçamentos (100, 150 e 200 mm). Realizou-se ensaio de carga de três pontos. A taxa de aquecimento foi muito lenta e não seguiu nenhuma curva de incêndio padrão.

Os resultados do ensaio de carga de três pontos revelaram que o reforço foi eficaz na recuperação da capacidade de carga nas vigas danificadas a 300°C e 500°C , mas não quando expostas a 600°C . Sendo assim, a carga máxima restaurada foi de até 149% e 130%, para a viga exposta a 300°C (laminado com espaçamento de 200 mm) e 500°C (laminados com espaçamento de 100 mm), respectivamente, em relação à viga de controle à temperatura ambiente. Essa superação da capacidade original das

vigas demonstra o potencial do reforço com CFRP em não apenas recuperar, mas também aumentar a capacidade de carga das estruturas. O estudo também confirmou que a redução do espaçamento entre os laminados elevou a capacidade de carga ao cisalhamento, desde que a falha por arrancamento do cobrimento de concreto fosse evitada. Por fim, um resultado consistente com outros estudos na área, não foi possível a recuperação da rigidez das vigas.

3.4 Jadooe et al. (2018a)

Tratam do estudo experimental e numérico do comportamento de 12 vigas de CA (140 mm × 260 mm × 2700 mm), após aquecimento à 700 e 800 °C, por duas horas, sob a curva de incêndio padrão ISO-834. Essas temperaturas são críticas, pois causam uma degradação significativa do concreto — com a desidratação e a decomposição dos silicatos do cimento — e uma perda drástica de resistência e rigidez da armadura de aço. Posteriormente as vigas foram reforçadas à flexão com laminados de CFRP, com largura de 20 mm e altura adequada para a ranhura de 25 mm de profundidade, utilizando a técnica NSM e coladas com epóxi. Algumas vigas foram testadas com e sem isolamento na superfície superior do concreto. As amostras foram testadas em configuração de carregamento a quatro pontos.

Os resultados dos ensaios foram satisfatórios em relação a capacidade de carga. As vigas reparadas sem isolamento recuperaram até 115% da carga máxima após exposição a 700 °C, em relação às condições iniciais de projeto. No caso das vigas reparadas com isolamento, recuperaram até 129% e 127% da carga última, após exposição a 700 e 800 °C, respectivamente. Este aumento na capacidade de carga final, superando o valor original de projeto, ressalta o potencial do reforço com CFRP, pois além de restaurar a capacidade de carga, também houve aumento em relação a capacidade de carga inicial projetada. A diferença no desempenho entre as vigas isoladas e não isoladas indica que o isolamento atua preservando as propriedades do concreto e contribuindo para uma melhor performance geral da estrutura. No entanto, se tratando da capacidade de rigidez inicial da peça não foi possível recuperar.

Obaidat et al. (2020)

Estudam o comportamento de 11 vigas de CA (150 mm × 200 mm × 1150 mm) após aquecimento de 600 °C, por três horas, com taxa de aquecimento inicial de 300°/hr e, em seguida, constante. Essa temperatura e tempo de exposição é crítica, pois causa uma degradação significativa tanto do concreto quanto do aço. Depois das vigas resfriadas foram reforçadas com tiras (200 × 0,166 mm) e cordas NSM-CFRP, além de folhas de CFRP, com o objetivo de analisar o comportamento à flexão. As vigas foram testadas sob carregamento de quatro pontos. Dentre as vigas reforçadas com laminados

de CFRP, após o incêndio, destacam-se a viga reforçada com tiras longitudinais inferiores e a viga reforçada com tiras longitudinais inferiores e nas laterais.

Os resultados apontam que as vigas reforçadas à flexão romperam ao cisalhamento e apresentaram recuperação da capacidade de carga final e da rigidez em um percentual de aproximadamente 91% e 68%, em relação a viga de referência em temperatura ambiente, respectivamente. Devido a isso, para melhorar a capacidade de carga ao cisalhamento, a viga foi reforçada ao cisalhamento. Dessa maneira, as vigas, após a ação do fogo e reforçadas com tiras inferiores e nas laterais, falharam à flexão e, com isso, apresentaram capacidade de carga final e rigidez em um percentual de aproximadamente 93% e 69%, respectivamente. Embora não foi possível recuperar a capacidade de carga das vigas após o reforço, esse estudo é de grande relevância para a área, pois ele indica que o sucesso da reabilitação de vigas de concreto armado pós-incêndio depende de uma avaliação completa dos danos. Simplesmente reforçar somente à flexão pode não ser suficiente.

3.5 Ashteyat et al. (2020)

Apresentam o reforço com diferentes quantidades e posicionamento de laminados de fibra de carbono ($15 \times 2,5$ mm), por meio da técnica SNSM, a fim de aumentar a resistência à flexão de 12 vigas ($150 \times 150 \times 750$ mm), em balanço de concreto auto-adensável, após aquecimento de 400 °C e 500 °C. A escolha do concreto auto-adensável e a faixa de temperatura são pontos-chave do estudo, pois esse tipo de concreto, com baixa relação água-cimento e maior densidade, pode apresentar um comportamento particular quando exposto ao calor, como maior suscetibilidade ao deslocamento explosivo. O comportamento mecânico foi analisado sob carregamento estático de um ponto, atuando nas extremidades das vigas, sendo o teste de carga realizado com dois pontos.

Sendo assim, duas tiras de reforço proporcionaram melhor contribuição para a resposta mecânica. Constatou-se que, para todas as propostas de reforço, foi possível recuperar a capacidade de carga das vigas após exposição de altas temperaturas que simulam o incêndio. As vigas aquecidas a 400 °C e 500 °C, e depois reforçadas, recuperaram a capacidade de carga final em até 173% e 125%, respectivamente. Ademais, ocorreu a recuperação da rigidez inicial das peças após o reforço. A recuperação mais acentuada para as vigas expostas a 400 °C pode ser explicada pelo menor nível de dano térmico no concreto e na armadura de aço em comparação com as vigas de 500 °C, o que permite uma ancoragem mais eficiente do reforço de fibra de carbono.

3.6 Jadooe et al. (2018b)

Esta pesquisa realizou um programa experimental e numérico com o objetivo de analisar o comportamento de 12 vigas de CA ($140 \times 260 \times 2700$ mm), após o incêndio (700°C e 800°C), sob a curva de incêndio padrão ISO 834, por duas horas, e posteriormente reforçadas à flexão com laminados de NSM CFRP, com largura de 20 mm e altura adequada para a ranhura de 25 mm de profundidade. A principal inovação desta pesquisa, além dos laminados de CFRP, é a utilização de um adesivo cimentício para fixar os laminados de NSM CFRP. Diferentemente dos adesivos epóxi, que são a escolha mais comum. Também se optou pela adição de isolamento na superfície do concreto. A resposta mecânica foi analisada mediante ensaio de carregamento de quatro pontos.

As vigas pós-aquecimento, posteriormente reparadas com NSM CFRP e sem isolamento, recuperaram até 105% da carga máxima, após dano de 700°C , em relação à capacidade de carga inicial. As vigas depois de aquecidas e reforçadas com fibra e isolamento recuperaram até 119% e 110% na carga última, após a exposição a 700 e 800°C , respectivamente. Com isso, a reabilitação das vigas foi benéfica em relação a recuperação da capacidade de carga. No entanto, o estudo consta que não houve a recuperação da capacidade de rigidez inicial.

3.7 Lenwari et al. (2020)

Este trabalho apresenta o desempenho de 15 vigas T de CA após aquecimento de 700 e 900°C , sob a curva de incêndio padrão ISO 834, por três horas. Temperaturas cruciais devido a degradação severa do concreto e do aço. Depois das vigas resfriadas foram reforçadas à flexão com placas de CFRP ($1,2 \times 50$ mm), placas de CFRP curtas (1100 mm de comprimento) ou longas (1800 mm de comprimento), coladas externamente ao concreto (técnica EBR). As vigas, com profundidade total de 300 mm, espessura da alma de 150 mm, largura do flange de 400 mm, espessura do flange de 100 mm e comprimento do vão de 2100 mm, foram ensaiadas por meio do teste flexão de quatro pontos, vigas pós-incêndio com descargas e recargas periódicas, e sem e com cargas de serviço existentes aplicadas.

Desse modo, os resultados apresentaram melhora na capacidade de carga das vigas (700°C) sem carregamento de serviço, e depois reforçadas com CFRP em 110% (placa curta) e 131% (placa longa), em relação à viga de referência em temperatura ambiente. Para as expostas à temperatura de 900°C , recuperaram até 108% (placa curta) e 119% (placa longa). A diferença no desempenho entre as placas curtas e longas destaca a importância do comprimento do reforço para garantir uma ancoragem adequada e a plena ativação da capacidade à tração do CFRP. Além disso, todas as peças recuperaram a capacidade de carga inicial, e constatou-se que as vigas aquecidas a 700°C , resfriadas e depois reforçadas com laminados de CFRP, recuperaram a rigidez inicial.

3.8 Haddad e Yaghmour (2020)

Com o propósito de recuperar o desempenho estrutural à flexão, os autores apresentam o estudo da eficiência de tiras de CFRP (15 mm × 2,5 mm) montadas utilizando a técnica SNSM (*side near-surface mounted*), com diferentes configurações de perfis de reforço (reto, parabólico e trapezoidal), em 11 vigas de CA (150 mm × 250 mm × 1400 mm), após expostas ao aquecimento de 400 e 500 °C, por três horas. Essas temperaturas são críticas, pois causam degradação gradual do concreto e do aço. A taxa de aquecimento não obedeceu a nenhuma curva de incêndio padrão e evidenciou um aquecimento muito lento. Com isso, foi realizada a resposta mecânica à flexão das amostras por meio de teste de carga de quatro pontos.

Portanto, o uso de perfis trapezoidais externos e internos para reparar as vigas após a ação do incêndio proporcionou melhor desempenho na capacidade de carga (165% e 143%) e rigidez (166% e 143%) para danos de 400 °C e 500 °C, respectivamente, em relação à viga de controle em temperatura ambiente. A geometria dos perfis trapezoidais pode ter melhorado a distribuição de tensões na interface entre o CFRP e o concreto, otimizando a ancoragem e, conseqüentemente, a contribuição do reforço. Este resultado sugere que o design do reforço, e não apenas o material, é um fator crítico para a eficácia da reabilitação.

O estudo também demonstrou que, com exceção da viga exposta a 500 °C e reforçada com o perfil de linha reta, a maioria das vigas reforçadas recuperou a capacidade de carga inicial. A falha na recuperação da capacidade de carga da viga com perfil reto a 500 °C destaca a limitação de um design simples em cenários de dano térmico mais severo, onde a degradação do concreto pode comprometer a ancoragem de reforços menos otimizados. Ademais, a rigidez inicial foi totalmente recuperada em todas as amostras reforçadas, com isso sugere que o uso de perfis otimizados e a técnica SNSM pode ser uma estratégia eficaz para restaurar ambas as propriedades, capacidade de carga e capacidade de rigidez.

3.9 Costa et al. (2023)

O objetivo deste estudo é avaliar o reforço ao cisalhamento de 13 vigas de CA (160 × 300 × 1460 mm). As vigas foram submetidas à curva de incêndio padrão ISO-834 por diferentes durações (60, 90 e 120 minutos), o que permitiu uma análise do dano térmico em função do tempo de exposição. Após resfriadas foram reforçadas com laminados de CFRP (10 × 1,2 mm), com espaçamentos de 75, 150 e 200 mm, por meio da técnica NSM. Com a finalidade de analisar a capacidade residual de cisalhamento, as vigas foram submetidas ao teste de carga de três pontos.

Conclui-se que, para a maioria das vigas danificadas pelo calor, e posteriormente reparadas com NSM ao cisalhamento, ocorre a recuperação da capacidade de

cisalhamento inicial, com aumento significativo. A única viga que não recuperou a capacidade inicial de cisalhamento foi aquela exposta ao incêndio por 120 minutos e reforçada com o espaçamento mais amplo de 200 mm. Esse resultado sugere que, para um dano térmico mais severo (maior tempo de exposição), o espaçamento do reforço se torna um fator crítico. Além disso, um menor espaçamento entre os laminados proporciona maior capacidade de carga e capacidade de rigidez. No entanto, a rigidez inicial das vigas de CA não foi recuperada.

3.10 Barham et al. (2022)

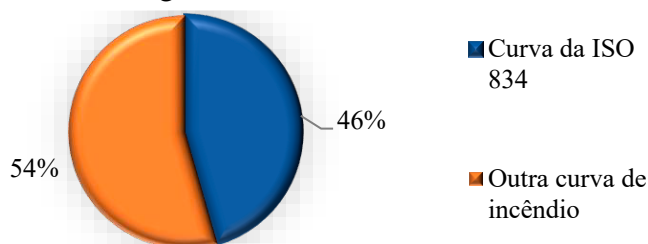
Apresentam o estudo do comportamento de 16 vigas de CA (100 × 150 × 1150 mm), exposta a 400°C, por três horas, inicialmente aquecidas à taxa de 40°/min e, em seguida, com taxa constante. Essa temperatura, embora moderada, causa degradação na pasta de cimento e na interface de aderência do concreto, reduzindo sua resistência. As vigas foram moldadas utilizando agregados grossos de concreto reciclado (ACR) em diferentes volumetrias (0%, 25% e 50%). Após o aquecimento, as vigas foram reforçadas à flexão com tiras (15 × 2,5 mm) de NSM CFRP. Dessa forma, as vigas foram ensaiadas em um teste de flexão de quatro pontos para analisar a resposta mecânica.

Percebeu-se que a maior recuperação da capacidade de carga ocorreu quando as vigas foram reforçadas com dois laminados laterais (ACR 50%), com recuperação de até 66 kN (145%), enquanto o reforço utilizando um laminado na parte inferior da viga (ACR 50%) obteve uma recuperação da capacidade de carga de até 63 kN (141%). Conclui-se que, ao acrescentar o agregado reciclado ao concreto, houve redução da capacidade de carga das peças, mas o percentual de recuperação da rigidez aumentou. No entanto, em nenhum caso a rigidez foi totalmente recuperada.

4 Discussões

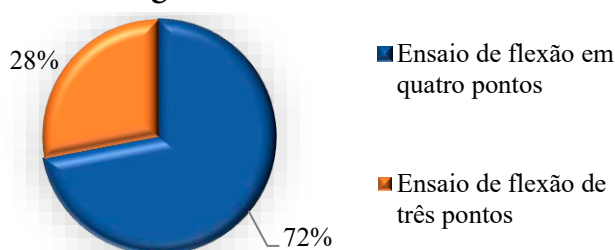
Os resultados dos 11 trabalhos elegíveis da revisão sistemática são apresentados no Quadro 2. Cinco dos 11 trabalhos (46%) seguem a curva de incêndio padrão ISO 834, e seis trabalhos (55%) não seguem nenhuma curva de incêndio padrão (Figura 6). Todas as vigas biapoiadas, com seções retangulares, possuem dimensões que variam de 140 mm a 160 mm para a base, de 200 mm a 300 mm para a altura e de 1150 mm a 2700 mm para o comprimento da viga, com exceção de dois trabalhos: um em seção T (Lenwari et al., 2020) e o outro com viga de CA em balanço (Ashteyat et al., 2020). A quantidade de vigas estudadas em cada trabalho varia de oito a 22 amostras.

Figura 6. Curva de incêndio



Oito trabalhos (72%) adotam o ensaio de flexão em quatro pontos como método de ensaio, possivelmente para se ter flexão pura na região central da viga. Dois estudos (28%) optaram pelo teste de flexão de três pontos, cuja ruptura ocorreu por cisalhamento (Figura 7).

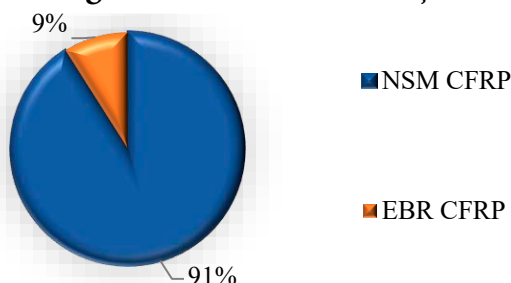
Figura 7. Método de ensaio



Dez trabalhos utilizaram a técnica NSM (91%), possivelmente porque a técnica EBR tem tendência a descolar com mais facilidade dos elementos de reparo em baixas tensões, em especial quando o concreto é submetido a elevadas temperaturas, onde o concreto se torna mais frágil (Jadooe et al., 2017b; Jadooe et al., 2017c). Em contrapartida, a técnica NSM FRP fornece uma camada de proteção, tornando-o menos vulnerável aos danos causados pelo incêndio ou por cargas mecânicas (Haddad e Almomani, 2017; Haddad e Almasaeid, 2016).

O único trabalho que utilizou a técnica EBR (9%) dentre os trabalhos elegíveis obteve uma recuperação melhor do que a técnica NSM. No entanto, isso pode ser causado pelo tipo de seção da viga estudada, que foi a seção em T (Lenwari et al., 2020), enquanto os demais trabalhos utilizaram seção retangular (Figura 8).

Figura 8. Técnica de reforço



A equação para calcular a taxa de armadura tracionada é regida pela Equação 1, enquanto a Equação 2 apresenta a taxa de armadura de cisalhamento, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2004).

$$\rho_l = \frac{A_s}{b \times h} \quad (1)$$

Onde:

ρ_l = Taxa de armadura de aço longitudinal tracionado, A_s = Área de aço tracionado, b = Largura da viga, h = altura da viga.

$$\rho_t = \frac{A_{sw}}{b \times s} \quad (2)$$

ρ_t = Taxa de armadura transversal de aço; A_{sw} = Área de aço transversal, b = Largura da viga, s = espaçamento entre os estribos.

As taxas de armadura de aço, tanto a longitudinal quanto a transversal, são indicadores cruciais para a avaliação da segurança estrutural e para a tomada de decisões sobre reforços. A relação entre a taxa de armadura longitudinal (ρ_l) e a transversal (ρ_t) é um fator determinante para identificar o modo de falha mais provável da estrutura, seja por flexão ou por cisalhamento.

Portanto, quando a taxa de armadura longitudinal é menor que a transversal ($\rho_l < \rho_t$), a viga apresenta maior deficiência à flexão, justificando a aplicação de reforço com CFRP para esse tipo de esforço. Inversamente, quando a taxa de armadura transversal é a deficiente em relação à longitudinal ($\rho_t < \rho_l$), o reforço com CFRP deve ser direcionado ao cisalhamento. Essa análise, baseada nas taxas de armadura, permite uma otimização do projeto de reforço, direcionando o uso de materiais de alto custo, como o CFRP, para a deficiência específica da estrutura, tornando a intervenção mais eficiente e econômica.

Com isso, todos os trabalhos estudados (100%) utilizaram a taxa de armadura transversal do aço (ρ_t) maior que a taxa de armadura tracionada (ρ_l), cuja falha da viga ocorreu por flexão. Quando a taxa de armadura transversal do aço (ρ_t) menor que a taxa de armadura tracionada (ρ_l), a falha da viga ocorre por cisalhamento.

Os trabalhos apresentaram a espessura do laminado, a altura (técnica NSM) e a largura (técnica EBR), sendo possível calcular a taxa de contribuição do laminado de CFRP. A taxa de reforço à flexão foi calculada por meio da Equação 3, derivada da Equação 1, devido ao reforço do laminado estar posicionado de forma semelhante à armadura tracionada da viga de CA. A taxa de reforço ao cisalhamento foi calculada por meio da Equação 4 (Costa et al., 2023).

$$Rf = \frac{A}{A_g} \quad (3)$$

Onde:

Rf = Relação de reforço à flexão, A = área de CFRP em flexão, A_g = área transversal da viga.

$$Rc = \frac{A_f}{(b \times s_f \times \sin \theta_f)} \quad (4)$$

Onde:

Rc = Relação de reforço: ao cisalhamento; A_f = área de CFRP em cisalhamento em ambos os lados da viga, b = largura do feixe; s_f = espaçamento de laminados. θ_f = Ângulo de inclinação do laminado.

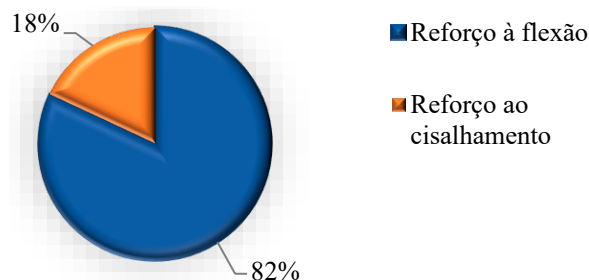
A taxa de reforço influencia os resultados da capacidade de carga e rigidez das peças após o incêndio. O aumento da taxa de reforço em vigas de CA pós-incêndio ocasiona aumento da capacidade de carga (Ashteyat et al., 2020), (Costa et al., 2023), (Haddad; Almasaeid, 2016).

As amostras reparadas com adesivo epóxi constaram maior recuperação, do que quando reparadas com cola a base cimentícia. Além disso, quando reparadas com isolamentos e reforçadas, apresentaram maior recuperação da peça de CA em comparação com as vigas sem isolamento.

A escolha das temperaturas de aquecimento em estudos de reabilitação de vigas de concreto armado é um fator determinante, pois é a temperatura que induz as mudanças nas propriedades físico-químicas dos materiais. Cada material, concreto e aço, reage de forma distinta a faixas de temperatura específicas, o que justifica a concentração dos estudos em patamares acima de 500 °C. Pois em temperaturas acima de 500 °C já ocorreu a perda de água livre e fisicamente ligada ao concreto, causando aumento da porosidade e microfissuras superficiais. No aço tem-se a perda drasticamente de sua resistência à tração e seu módulo de elasticidade, podendo chegar a uma perda de 50% de sua capacidade origina.

Nove estudos (82%) analisaram vigas após incêndio e, posteriormente, reforçadas à flexão (Figura 9), e todos eles optaram pelo parâmetro de aquecimento em estado estacionário, com temperatura variando de 400 °C a 900 °C. Dois trabalhos (18%) trataram do reforço ao cisalhamento de vigas pós-incêndio: um com parâmetro de aquecimento em estado estacionário de 300 °C a 600 °C, e o outro com estado transiente de temperatura, em tempos de 60, 90 e 120 min, alcançando mais de 1000 °C.

Figura 9. Posição do reforço



A capacidade de carga das vigas reforçadas à flexão com a técnica NSM, após a ação do fogo, é recuperada (115%) até a exposição a uma temperatura de 800 °C; a capacidade de rigidez também foi recuperada. Para o reforço ao cisalhamento das vigas pós-incêndio, a rigidez não foi recuperada, mas a capacidade de carga foi restaurada até 500 °C, em estado estacionário de temperatura (Haddad e Almasaeid, 2016). A restauração foi atingida a mais de 1000 °C, em estado transiente de temperatura, forno/viga (Costa et al., 2023).

Quadro 2. Parâmetros das amostras ensaiadas

Autor	n° vigas	Seção da viga (mm × mm)	Comprimento (mm)	Método de Ensaio	Técnica	Tipo de reforço analisado	Parâmetro de avaliação	Regime de aquecimento	Taxa de armadura cisalhante (%)	Taxa de armadura Tracionada (%)	Dimensões do laminado (mm × mm)	Taxa de reforço (%)	n° citações
JADOOE et al., (2017a)	8	R:140 × 260	2700	4 pontos	NSM	Flexão	600 e 700°C	ISO 834	0,90	0,62	20 × N.I.	N.I.	51
HADDAD e ALMOMANI, (2017)	20	R:150 × 250	1400	4 pontos	NSM	Flexão	600°C	-	0,89	0,60	15 × 2,5	0,10	50
HADDAD e ALMASAEID, (2016)	22	R:150 × 250	1400	3 pontos	NSM	Cisalhamento	300, 500 e 600°C	-	0,13	1,68	15 × 2,5	0,25	26
JADOOE et al., (2018a)	12	R:140 × 260	2700	4 pontos	NSM	Flexão	700 e 800 °C	ISO 834	0,90	0,62	20 × N.I.	N.I.	22
OBAIDAT et al. (2020)	11	R:150 × 200	1150	4 pontos	NSM	Flexão	600°C	-	0,89	0,52	2,5 × N.I.	N.I.	22
ASHTHEYAT et al., (2020)	12	R:150 × 150	750	2 pontos	NSM	Flexão	400 e 500°C	-	1,34	1,01	15 × 2,5	0,17	21
JADOOE et al., (2018b)	12	R:140 × 260	2700	4 pontos	NSM	Flexão	700 e 800 °C	ISO 834	0,90	0,62	20 × N.I.	N.I.	16
LENWARI et al., (2020)	15	T :400 x 300	2700	4 pontos	EBR	Flexão	700 e 900 °C	ISO 834	1,34	1,01	1,2 × 50	0,11	16
HADDAD e YAGHMOUR, (2020)	11	R:150 × 250	1400	4 pontos	NSM	Flexão	400 e 500 °C	-	1,31	0,60	15 × 2,5	0,10	12
COSTA et al., (2023)	13	R:160 × 300	1460	3 pontos	NSM	Cisalhamento	60, 90 e 120 min	ISO 834	0,13	0,33	10 × 1,2	0,11	9
BARHAM et al., (2022)	16	R:100 × 150	1150	4 pontos	NSM	Flexão	400°C	-	2,01	1,05	15 × 2,5	0,25	3

5 Conclusões

Por meio dos estudos apresentados, as seguintes conclusões podem ser afirmadas:

- ◆ O uso de laminados de CFRP em vigas de concreto armado pós-incêndio melhora a recuperação da capacidade de carga das vigas de CA.
- ◆ Na maioria dos casos, foi possível restaurar a capacidade de carga inicial da viga ou até mesmo aumentar em até 74% do valor inicial;
- ◆ Quanto maior o dano devido ao incêndio, menor a recuperação da capacidade de carga e rigidez através do reforço;
- ◆ A técnica NSM aparenta ser mais eficiente em relação à técnica EBR;
- ◆ Para recuperação das amostras submetidas a elevadas temperaturas e posteriormente reforçadas, depende de vários parâmetros: técnica de colagem do CFRP, tipo de reforço, dano da temperatura, quantidade de laminados e espaçamento entre eles, tipo de adesivo, carregamento e ambiente submetido as vigas.
- ◆ Por meio da revisão sistemática, observa-se uma quantidade de estudos na literatura ainda é muito escassa, acerca dessa temática. Faz-se necessária uma maior quantidade de dados experimentais sobre o tema.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro recebido da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco – FACEPE, no âmbito do Projeto APQ-1009-3.01/22 – Edital 29/22 APQ-Emergentes 2022 – FACEPE. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecemos a CAPES pela bolsa conferida à primeira autora.

Referências

- AGHABAGLOO, Mehdi et al. Externally bonded reinforcement side extended (EBRSE) technique to postponedebonding of FRP laminates in strengthened concrete elements. *Case Studies in Construction Materials*, p. e05066, 2025.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI 562-19. *Requisitos do Código para Avaliação, Reparo e Reabilitação de Estruturas de Concreto Existentes*. Farmington Hills, MI, USA, 2019
- ASHTYAT, A. M., HADDAD, R.; OBAIDAT, Y. T. Repair of heat-damaged SCC cantilever beams using SNSM CFRP strips. In: *Structures*, v. 24, p. 151-162. Abril, 2020. Elsevier.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118: *Projeto de estruturas de concreto Procedimento*. 2004.

BARHAM, WASIM; OBAIDAT, YASMEEN; ALKHATATBEH, HUTHAIFA. Behavior of heat damaged reinforced recycled aggregate concrete beams repaired with NSM-CFRP strips. *Magazine of Civil Engineering*, v. 111, n. 3, p. 11106, 2022.

COSTA, LEONARDO MEDEIROS DA ET AL. Aplicabilidade do método dos 500° C na determinação da resistência de vigas em concreto armado após incêndio. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 15, p. e15202, 2021.

COSTA, L. M.; PIRES, T. A. C.; SILVA, J. J. R. Shear strengthening of fire-damaged reinforced concrete beams using NSM CFRP laminates. *Engineering Structures*, v. 287, p. 116175, 2023.

COSTA, L. M.; SILVA, J. J. R.; PIRES, T. A. C. Procedure for determining the strength to shear of reinforced concrete beams strengthened with NSM CFRP. *Materials and Structures*, v. 55, n. 3, p. 97, 2022.

DEMIR, U.; GREEN, M. F.; ILKI, A. Postfire seismic performance of reinforced precast concrete columns. *PCI Journal*, v. 65, n. 6, 2020.

DIAS, Alisson Rodrigues de Oliveira et al. Comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, p. e-12629, 2020.

DONG-ER, H. et al. Experimental investigation on the interfacial debonding between CFRP and post-fire concrete under rapid loading. *Engineering Mechanics*, v. 36, n. B06, p. 285-292.

EMARA, M., BARRIS, C., BAENA, M., TORRES, L.; BARROS, J. Bond behavior of NSM CFRP laminates in concrete under sustained loading. *Construction and Building Materials*, v. 177, p. 237-246, 2018.

ESFAHANI, M., HOSEINZADE, M., SHAKIBA, M., ARBAB, F., YEKRANGNIA, M.; PACHIDEH, G. Experimental investigation of residual flexural capacity of damaged reinforced concrete beams exposed to elevated temperatures. *Engineering Structures* v. 240, p. 112388, 2021.

HADDAD, R. H.; ALMASAEID, H. H. Recovering shear capacity of heat-damaged beams using NSM-CFRP strips. *Construction and Building Materials*, v. 105, p. 448-458, 2016.

HADDAD, R. H.; ALMOMANI, O. A. Recovering flexural performance of thermally damaged concrete beams using NSM CFRP strips. *Construction and Building Materials*, v. 154, p. 632-643, 2017.

HADDAD, R. H.; YAGHMOUR, E. M. Retrofitting heat-damaged concrete beams using different profiles of side NSM CFRP strips. In: *Structures*, v. 28, p. 2232-2243, dezembro, 2020. Elsevier.

HADDAD, R.; AL-RABADI, E. Bond behavior between near-surface mounted fiber reinforced polymer strips and concrete using nonlinear finite element: a parametric study. *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 35, n. 14, p. 1534-1557, 2021.

HAWILEH, R. A., ABDALLA, J. A.; NASER, M. Z. Modeling the shear strength of concrete beams reinforced with CFRP bars under unsymmetrical loading. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, v. 26, n. 15, p. 1290-1297, 2019.

- IRSHIDAT, M. R.; AL-SALEH, M. H. Flexural strength recovery of heat-damaged RC beams using carbon nanotubes modified CFRP. *Construction and Building Materials*, v. 145, p. 474-482, 2017.
- JADOOE, A., AL-MAHAIDI, R.; ABDOKA, K. Behaviour of heat-damaged partially-insulated RC beams using NSM systems. *Construction and Building Materials*, v. 180, p. 211-228, 2018b.
- JADOOE, A., AL-MAHAIDI, R.; ABDOKA, K. (2017B). Bond behavior between NSM CFRP strips and concrete exposed to elevated temperature using cement-based and epoxy adhesives. *Journal of Composites for Construction*, v. 21, n.5, p. 04017033, 2017b.
- JADOOE, A., AL-MAHAIDI, R.; ABDOKA, K. Experimental and numerical study of strengthening of heat-damaged RC beams using NSM CFRP strips. *Construction and Building Materials*, v. 154, p. 899-913, 2017a.
- JADOOE, A.; AL-MAHAIDI, R.; ABDOKA, K. Modelling of NSM CFRP strips embedded in concrete after exposure to elevated temperature using epoxy adhesives. *Construction and Building Materials*, v. 148, p. 155–166, 2017c.
- JADOOE, A.; AL-MAHAIDI, R.; ABDOKA, K. Performance of heat-damaged partially-insulated RC beams strengthened with NSM CFRP strips and epoxy adhesive. *Construction and Building Materials*, v. 159, p. 617-634, 2018a.
- KADHIM, M. M.; ADHEEM, A.; JAWDHARI, A. R. Nonlinear finite element modelling and parametric analysis of shear strengthening RC T-beams with NSM CFRP technique. *International Journal of Civil Engineering*, v. 17, n. 8, p. 1295-1306, 2019.
- KHSHAIN, N. T.; AL-MAHAIDI, R.; ABDOKA, K. Bond behaviour between NSM CFRP strips and concrete substrate using single-lap shear testing with epoxy adhesive. *Composite Structures*, v. 132, p. 205-214, 2015.
- KÜLTÜR, Ömer Faruk; AL-MASRI, Abdulmenim; SAYIN, Baris. Effect of high temperature exposure on design parameters and collapse behavior of reinforced concrete and steel-framed buildings. *Case Studies in Construction Materials*, v. 17, p. e01263, 2022.
- LENWARI, A.; THONGCHOM, C.; ABOUTAHA, R. S. Cyclic flexural performance of fire-damaged reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer plates. *ACI Structural Journal*, v. 117, n. 6, p. 133-146, 2020.
- LI, W. *Experimental investigation on strength and deformation of concrete at high temperature*. 1991. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Tsinghua, Beijing, 1991.
- LIU, C. ET AL. Residual flexural behaviour comparison between composite and monolithic beams after fire exposure. *Journal of Building Engineering*, v. 64, p. 105584, 2023.
- LV, Y. ET AL. Effects of the embedding depth on the interfacial bond performance of horizontally NSM CFRP strips to concrete structures. In: *Structures*. Elsevier, v. 55, p. 1084-1095, 2023.
- MOHAMMED, A.; AL-SAAD, N. T. K.; AL-MAHAIDI, R. Assessment of bond strength of NSM CFRP strips embedded in concrete using cementitious adhesive made with graphene oxide. *Construction and Building Materials*, v. 154, p. 504-513, 2017.

MURAD, Y.; ABU-ALHAJ, T. Flexural strengthening and repairing of heat damaged RC beams using continuous near-surface mounted CFRP ropes. In: *Structures*. Elsevier, v. 33, p. 451-462, 2021.

NGUYEN, V. N.; CAO, V. V. Performance of Postfire Reinforced Concrete Beams Retrofitted with External Bonded and Near-Surface Mounted CFRP: Experiments and Analyses. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 37, n. 3, p. 04023016, 2023.

OBAIDAT, Y. T.; Barham, W. S.; Abdelrahman, B. N. Effect of elevated temperature on the bond behavior between near Surface Mounted-Carbon Fiber Reinforced Polymers strips and Recycled Aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 251, p. 118970, 2020.

ÖZBERK, D. D. Cost Comparative Analysis of Passive Fire Protection Methods in Steel Structures Systems (MSc thesis), Pamukkale University. *Science Institute, Denizli, Turkey*, 2010.

PAGE, M. J. ET AL. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *International journal of surgery*, v. 88, p. 105906, 2021.

RASHID, R.; OEHLERS, D. J.; SERACINO, R. Ic de bonding of FRP NSM and EB retrofitted concrete: plate and cover interaction tests. *Journal of Composites for Construction*, v. 12, n. 2, p. 160-167, 2008.

SIDDIKA, A. ET AL. Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs—A state-of-the-art review. *Engineering Failure Analysis*, v. 111, p. 104480, 2020.

WANG, X.; CHENG, L. Bond characteristics and modeling of near-surface mounted CFRP in concrete. *Composite Structures*, v. 255, p. 113011, 2021.,

ZHANG, S. S. Bond strength model for near-surface mounted (NSM) FRP bonded joints: Effect of concrete edge distance. *Composite Structures*, v. 201, p. 664-675, 2018.