

REFORÇO APÓS INCÊNDIO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DE CFRP

*Kézia Brasilino de Souza*¹

<https://orcid.org/0000-0003-3570-7201>

*Leonardo Medeiros da Costa*²

<https://orcid.org/0000-0002-3271-680X>

*Tiago Ancelmo de Carvalho Pires*³

<https://orcid.org/0000-0003-4861-4944>

*José Jéferson do Rêgo Silva*⁴

<https://orcid.org/0000-0001-7941-1061>

RESUMO

Este artigo apresenta um estado da arte sobre o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas, após altas temperaturas, por meio da técnica NSM (*near-surface mounted*) com uso de CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*), avaliadas quanto a capacidade de carga e rigidez no ensaio de flexão. Foram apresentados os programas experimentais dos trabalhos disponíveis na literatura sobre o reforço após o aquecimento de vigas, considerando diferentes cenários para o reparo NSM-CFRP, como tipo adesivo (epóxi ou cimentício), seção transversal do CFRP (laminados ou cabos), e espaçamentos distintos entre as fibras. Os resultados foram analisados e discutidos, a fim de compreender o desempenho dos corpos de prova após altas temperaturas e a viabilidade técnica do uso do sistema de reforço. O desempenho do reforço depende diretamente das interfaces entre CFRP-adesivo-concreto. Dessa forma, uma discussão foi conduzida sobre a eficiência dos sistemas apresentados direcionada ao modo de falha entre a fibra e a estrutura de concreto armado, com isso fica evidente a perda da carga das vigas após incêndio e a eficiência do sistema de reforço para seu reparo, com uso de diferentes técnicas.

Palavras-chave: Vigas; Concreto Armado; Incêndio; Fibras CFRP.

¹Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Vale do São Francisco, Mestranda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. Email: kezia.brasilino@ufpe.br

²Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. Professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba. E-mail: lmcosta@servidor.uepb.edu.br.

³Doutor em Construções Metálicas e Mistas pela Universidade de Coimbra. Professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. Email: tiago.poliveira@ufpe.br.

⁴Doutor em Engenharia Civil pela Wessex Institute Of Technology Portsmouth University. Professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. Email: jose.jrsilva@ufpe.br.

STRENGTHENING OF FIRE DAMAGED REINFORCED CONCRETE BEAMS THROUGH CFRP

ABSTRACT

This paper presents a state of the art on the behavior of reinforced concrete beams strengthened, after high temperatures, by means of the NSM (near-surface mounted) technique using CRFP (carbon fiber reinforced polymer), evaluated for load capacity and stiffness in the bending test. The experimental programs of the works available in the literature on strengthening after beam heating were presented, considering different scenarios for the NSM-CFRP repair, such as adhesive type (epoxy or composite), CFRP cross section (laminates or cables), and distinct fiber spacings. The results were analyzed and discussed in order to understand the performance of the specimens after high temperatures and the technical feasibility of using the reinforcement system. The reinforcement performance depends directly on the CFRP-adhesive-concrete interfaces. Thus, a discussion was conducted about the efficiency of the presented systems directed to the failure mode between the fiber and the reinforced concrete structure, with this it is evident the loss of load of the beams after fire and the efficiency of the strengthening system for its repair, with the use of different techniques.

Keywords: Beams; Reinforced concrete; Fire; CFRP.

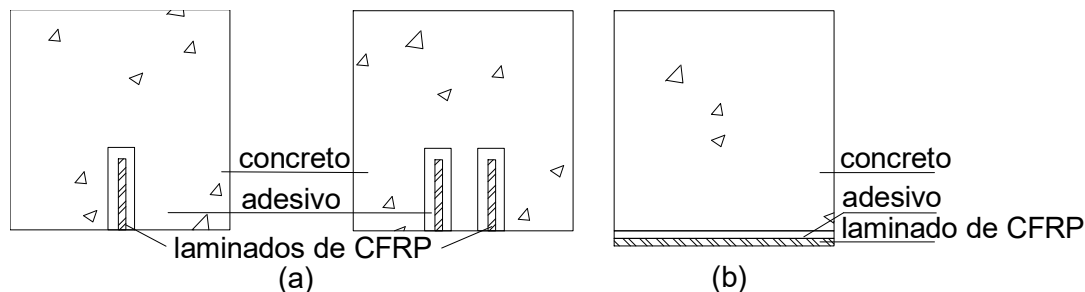
Artigo Recebido em 06/01/2023 e Aceito em 17/03/2022

1. INTRODUÇÃO

É sabido que situações de incêndio em estruturas de concreto armado causam danos severos aos elementos estruturais. Costa et al. (2022) afirmam que quando não ocorre a falha durante o incêndio, faz-se necessário aferir o dano causado pós-sinistro, com a finalidade concluir a liberação do uso, reparação ou demolição da estrutura. Normalmente, as estruturas necessitam de intervenção para reabilitar sua condição inicial para o qual foi projetada. Neste sentido, o uso da técnica de reforço com materiais compósitos, como a fibra de carbono (carbon fibre reinforced polymer – CFRP, em inglês), através da técnica NSM (*near-surface mounted*) destaca-se pela eficiência em aumentar a capacidade de carga dos elementos pela aderência entre o concreto danificado pelo calor e o material de CFRP (laminados ou barras), inseridos em ranhuras pré cortadas na cobertura de concreto.

A técnica NSM (Figura 1a) em comparação com técnica de reforço colado externamente, *externally-bonded reinforced* – EBR (Figura 1b), é considerada mais promissora em vigas de concreto armado à flexão e ao cisalhamento, como apresentam Dias (2008), Arruda et al. (2015), Khalifa (2016), Firmo et al. (2017), Jiangtao et al. (2017) e Yu et al. (2018). Isto porque, de acordo com Coelho et al. (2015), a técnica NSM não necessita de retrabalho na preparação da superfície, fornece maior cobertura de proteção contra danos ambientais externos, apresenta um maior perímetro colado e o processo de instalação do reforço é mais rápido quando comparado com a técnica EBR. No entanto, estudo de vigas utilizando a técnica NSM após altas temperaturas ainda é pouco trabalhado.

Figura 1 – Modo de inserção do laminado (a) Técnica NSM com uma e duas ranhuras; (b) Técnica EBR



Fonte: Autores (2022).

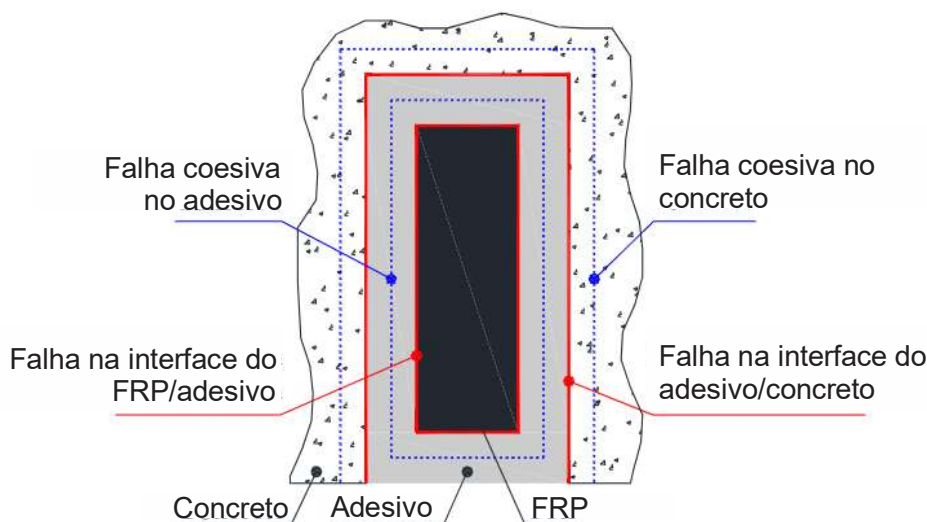
Al-Saadi et al. (2019) destacam que embora a o sistema NSM-FRP apresente eficácia superior a técnica EBR-FRP, as diretrizes e códigos atualmente disponíveis ainda estão voltadas ao sistema EBR. Os códigos de dimensionamento orientados para a técnica EBR que se destacam são SIA 166 (2004), CNR-DT 200 R1 (2013), CAN/CSA-S806-12 (2017), ACI 440 2.R (2017) e fib Bulletin 90 (2019). Prado (2016) destaca a demanda de mais pesquisas sobre utilização do reforço com CFRP em concreto, no Brasil, justifica-se isso devido a inexistência de normas que contemplem esse tema.

A eficiência do reforço depende diretamente do desempenho da aderência entre NSM CFRP e o concreto. O mecanismo da ligação CFRP-adesivo-concreto é complexo e sua qualidade é influenciada pela interação das estruturas de concreto reforçadas com os materiais compósitos, como destacam Al-Saadi et al. (2019) e Wang e Cheng (2021). Costa et al. (2022) declaram que se tratando da análise sobre a contribuição de laminados de CFRP inseridos no cobrimento do concreto, para reforçar as vigas de concreto armado, estudos mais complexos são requeridos. Desse modo, para estruturas pós incêndio, o diagnóstico do reparado é ainda mais elaborado em comparação com estruturas que não são submetidas ao sinistro.

O desempenho da ligação é influenciado diretamente por muitos parâmetros e sua análise após incêndio é ainda mais complexa. Dessa

maneira, o espaçamento do reforço, configuração do perfil de reparo, o tipo de CFRP, tipo do adesivo, e a temperatura e a taxa de aquecimento da peça antes do reparo, influenciam no modo de falha da ligação NSM FRP-concreto. Diante disso a falha pode ocorrer devido ao fenômeno de descolagem na interface, não limitando aos materiais (concreto, adesivo ou FRP) usados. Coelho et al. (2015) dividiram em quatro os modos de falha, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Modos de falha por descolagem na ligação



Fonte: Adaptado de Coelho et al. (2015)

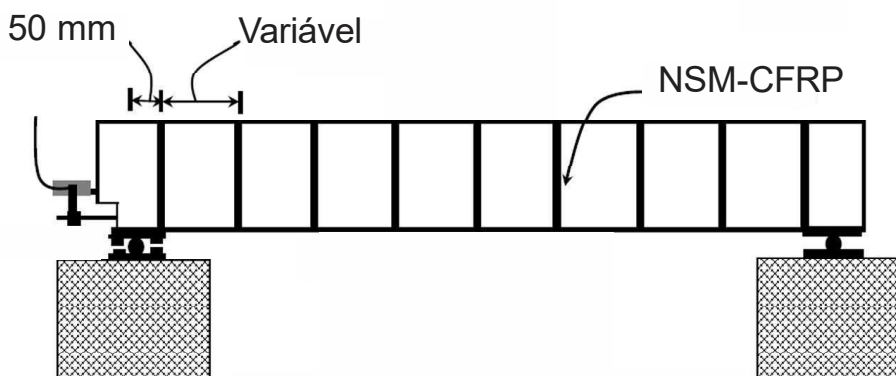
Diante desse contexto, o trabalho em questão utilizou a abordagem de pesquisa qualitativa, pesquisando dissertações, teses, artigos e resumos, a fim de realizar um estudo teórico bibliográfico, com objetivo de apresentar um estado da arte sobre desempenho das vigas de concreto armado, reforçadas com NSM CFRP, pós aquecimento, uma vez que ainda o tema é escasso na literatura.

2. ESTADO DA ARTE

Dedicado à apresentação de trabalhos desenvolvidos com objetivo de analisar vigas de concreto armado após exposição de altas temperaturas

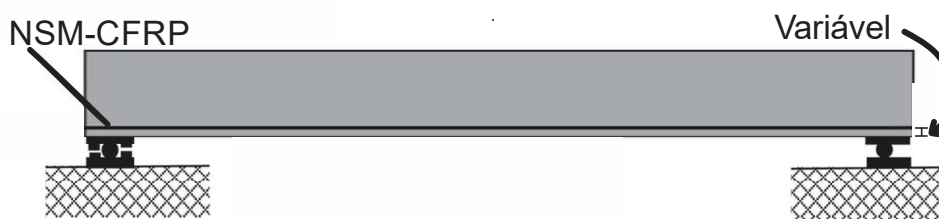
(situação de incêndio), resfriadas, e posteriormente reparadas com diferentes técnicas. Desse modo, o trabalho experimental de Haddad e Almasaeid (2016), trabalha o reforço ao cisalhamento com laminados NSM CFRP (Figura 3), após o dano de elevadas temperaturas, e as demais pesquisas, Al-Jadooe et al. (2017,2018), Haddad e Yaghmour (2020) e Haddad e Harb (2021), abordam o reparo com laminados ou cabos, de NSM CFRP à flexão (Figura 4), depois das vigas aquecidas. Diante desse contexto, são identificados os tipos de falha e a eficiência dos diferentes tipos de reparos.

Figura 3 – Configuração do reparo NSM-CFRP ao cisalhamento



Fonte: Adaptado de Haddad e Almasaeid (2016).

Figura 4 – Configuração do reparo NSM-CFRP à flexão



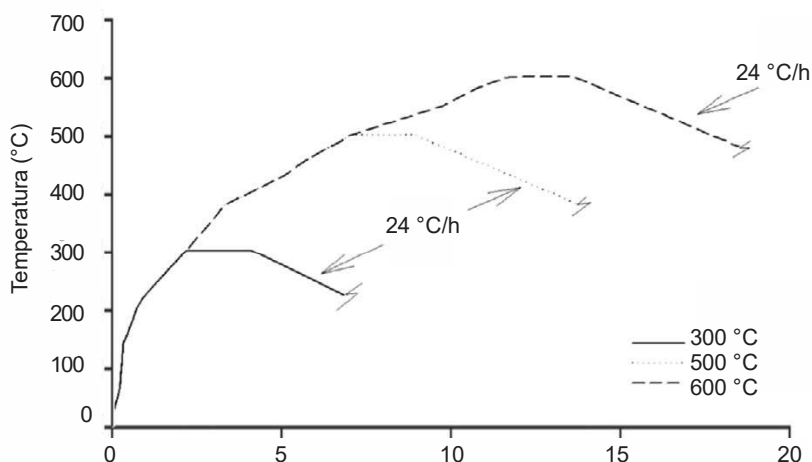
Fonte: Adaptado de Haddad e Almasaeid (2020).

2.1 Haddad e Almasaeid (2016)

Os autores relatam os resultados de 22 vigas em concreto armado (150 mm x 250 mm x 1400 mm), sendo 4 vigas controle à temperatura ambiente e

18 vigas em situação de incêndio, analisadas em duplicata. Todas as vigas foram dimensionadas para romper ao cisalhamento e aquecidas sob diferentes temperaturas (300, 500 e 600 °C) e após atingir a temperatura de ensaio, foram mantidas durante 2h e depois resfriadas lentamente, antes de reforçar. A taxa de aquecimento não seguiu nenhuma curva de incêndio padrão e apresentou um aquecimento muito lento, ver Figura 5.

Figura 5 – Temperatura do forno aplicada nas amostras



Fonte: Adaptado de Haddad e Almasaeid (2016)

As amostras variaram o espaçamento entre os laminados de CFRP (15 mm x 2,5 mm) aplicados a 100, 150 e 200 mm, sempre dispostos a 90° em relação ao eixo da viga e usando a técnica NSM. A distribuição das vigas pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição das amostras ensaiadas

Grupo	Amostras	ID	Temperatura (°C)	Reforço NSM CFRP	Espaçamento (mm)
1	2	C	23	Não	-
2	2	C-RS20	23	Sim	200
3	2	HD300	300	Não	-
4	2	HD300-RS20	300	Sim	200
5	2	HD500	500	Não	-
6	2	HD500-RS10	500	Sim	100

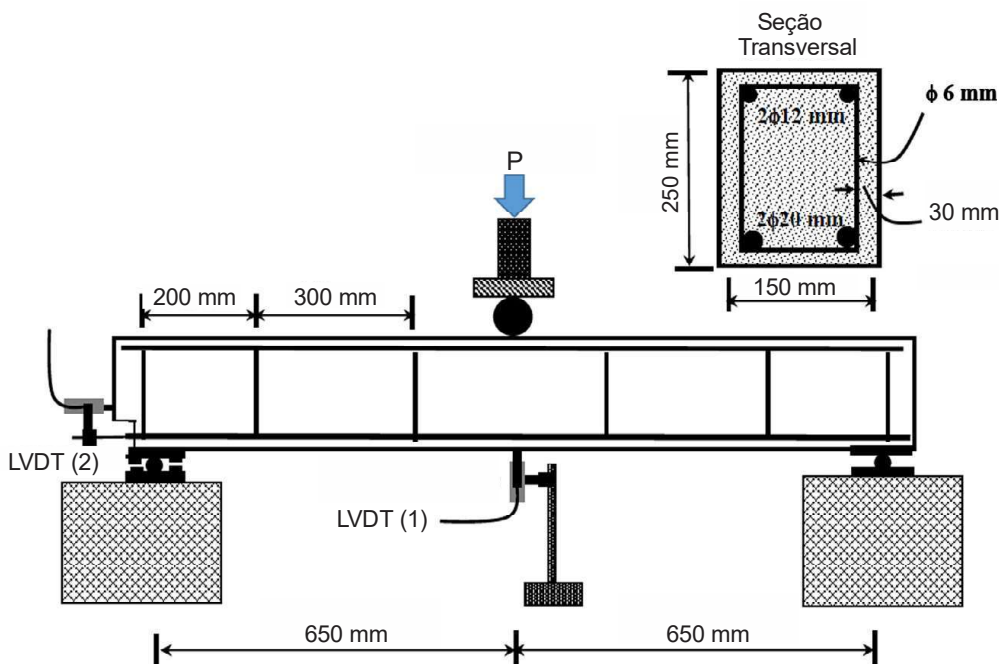
Tabela 1 – Distribuição das amostras ensaiadas

Grupo	Amostras	ID	Temperatura (°C)	Reforço NSM CFRP	Espaçamento (mm)
7	2	HD500-RS20	500	Sim	200
8	2	HD600	600	Não	-
9	2	HD600-RS10	600	Sim	100
10	2	HD600-RS15	600	Sim	150
11	2	HD600-RS20	600	Sim	200

Fonte: Adaptado de Haddad e Almasaeid (2016).

Após aquecidas e resfriadas, as vigas foram reforçadas. Todas as amostras foram submetidas ao ensaio de flexão de três pontos, conforme Figura 6.

Figura 6 – Detalhe do ensaio mecânico da viga



Fonte: Adaptado de Haddad e Almasaeid (2016)

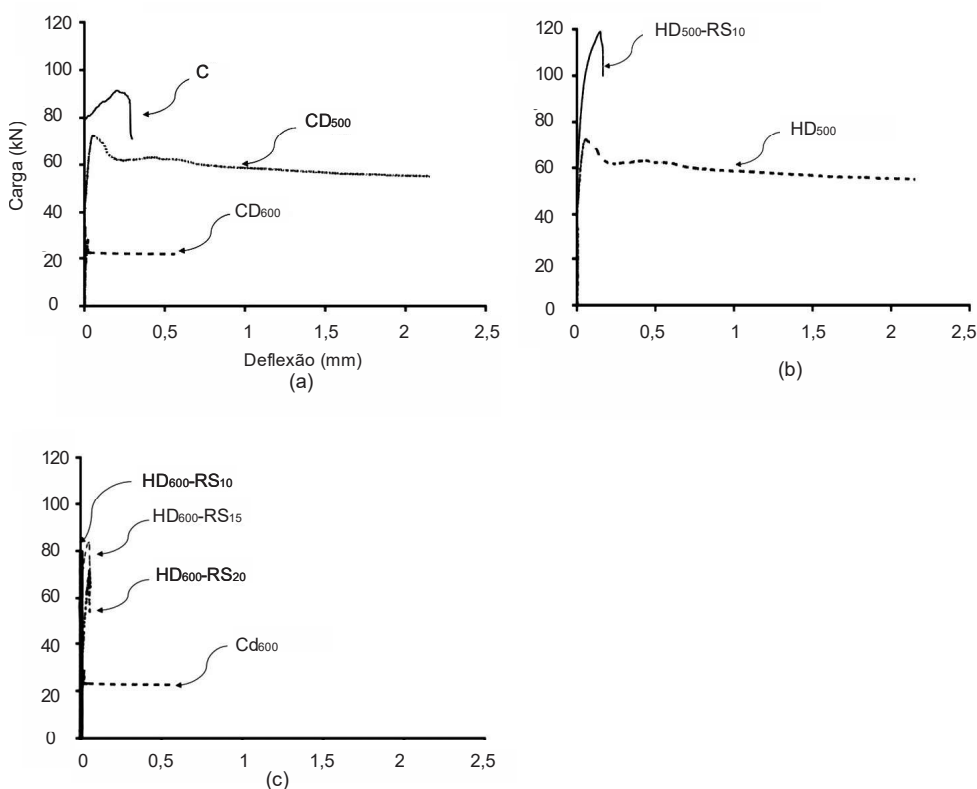
Desse modo, é visto que vigas pós-aquecimento a 300 °C e 500 °C sofreram trincas a flexão, embora após 600 °C não foi possível concluir o tipo de propagação das trincas.

A ausência da ruptura por cisalhamento esperada pode ser devido ao deslizamento entre a armadura e o concreto antes do seu escoamento. Portanto, o colapso das vigas aquecidas a 300 °C (RH300), 500 °C (RH300) e 600 °C (RH300) foi classificado como ruptura da aderência do concreto armado.

Para vigas expostas a elevadas temperaturas e depois reparadas com tiras de NSM-CFRP é visto diferentes modos de falha. Para as vigas HD300-RS20, a falha foi do tipo cisalhamento sem deslizamento na armadura principal, também não houve deslocamento do cobrimento de concreto.

As vigas HD500-RS10 e HD500-RS20 manifestaram falhas simultâneas por cisalhamento e descascamento, e ausência deslocamento entre a fibra e o concreto ou deslizamento entre a armadura principal e o concreto. No caso das peças (HD600-RS10), (HD600-RS15) e (HD600-RS20), as fissuras de flexão começaram na região central e com aumento da carga passaram a manifestar fissuras por cisalhamento.

Figuras 7 – Curvas de deslizamento de carga para diferentes vigas



Fonte: Adaptado de Haddad e Almasaeid (2016)

Os resultados experimentais indicam que os picos da curva aderência-deslizamento das vigas de concreto armado danificadas pelo calor e seguidas de reparo com laminados NSM CFRP, dependem principalmente do nível de dano e do espaçamento entre os laminados. A Figura 7, expressas as curvas de deslizamento de carga para os espécimes consideradas. As vigas submetidas a elevadas temperaturas perdem carga, quando comparadas a viga de controle (Figura 7a), ademais quanto maior a temperatura exposta da viga, maior é sua perda de carga. Em contrapartida, observa-se que estruturas danificadas pelo calor suportam uma carga maior, juntamente com uma menor deflexão quando reparadas, em relação à viga sujeita a mesma temperatura e sem reforço (Figura 7b). Além disso, é admissível pontuar que a redução do espaçamento entre laminados de CFRP, em vigas submetidas a uma mesma temperatura, é benéfica, pois ao

reduzir o espaçamento entre as tiras promove aumento de carga e redução da deflexão (Figura 7c). É possível destacar também que o desempenho pode chegar a ser superior à peça em temperatura ambiente a depender do distanciamento entre as tiras de CFRP.

Tabela 2 – Características mecânicas de vigas de controle, danificadas pelo calor, reforçadas e reparadas

ID	Rigidez (MN/m)	Carga Final (kN)
C	40,07 (100%)	5,25
C-RS20	35,89 (90%)	6,31
HD300	30,1 (75%)	2,22
HD300-RS20	35,9 (90%)	6,1
HD500	29 (72%)	2,69
HD500-RS10	19,71 (49%)	8,03
HD500-RS20	27,21 (70%)	6,34
HD600	17,04 (43%)	1,84
HD600-RS10	15,69 (39%)	12,02
HD600-RS15	14,13 (35%)	10,7
HD600-RS20	20,71 (52%)	8,26

Fonte: Adaptado de Haddad e Almasaeid (2016).

Ademais, por meio do diagrama carga-deflexão obtido no estudo de Haddad e Almasaeid (2016), foi possível extrair características acerca da capacidade de carga e rigidez dos corpos de prova após seu aquecimento e reforço, conforme a Tabela 2. Desse modo, é notável que todas as vigas (C) danificadas recuperaram a capacidade de carga em comparação a viga de controle. Ademais, destaca-se que sob mesma temperatura de aquecimento, amostras com menor espaçamento de reforço, evidenciaram maior capacidade de carga, em comparação a amostras sob mesma exposição de temperatura com maiores espaçamentos. Em relação a rigidez das vigas danificadas, todas foram reduzidas com o aquecimento, comparando com a

amostra de referência (C). Além disso, foi destacado que após o reparo NSM-CFRP houve aumento da rigidez da viga aquecida somente quando exposta à 300 °C, em relação a viga sob exposição de mesma temperatura após resfriada e sem reparo. Desse modo é possível concluir que a partir da exposição de 500 °C não alcançou a recuperação da rigidez das amostras pós aquecidas e reparadas. Esse fato também é notável em outros trabalhos de vigas pós-aquecidas reforçadas ao cisalhamento. Exemplo, na tese de Costa (2022), pode-se concluir que após incêndio a rigidez das peças foram aumentadas, contudo não foi recuperada à condição de referência à temperatura ambiente.

2.2 Al-Jadooe et al. (2017)

Relatam os resultados do comportamento de oito vigas de concreto armado (140 mm x 260 mm x 2700 mm). As vigas foram dimensionadas a fim de que as armaduras de cisalhamento suportem cargas adicionais devido a exposição a altas temperaturas (600 °C, 700 °C) obedecendo a curva de tempo e temperatura padrão ISO-834, por duas horas, com a finalidade de evitar a falha por cisalhamento antes da falha por flexão. Desse modo, investigou o programa experimental com diferentes variáveis: (a) temperatura, (b) vigas aquecidas e não aquecidas e (c) tipo de adesivo usado para laminado de CFRP. Dessa maneira, após as vigas serem expostas ao aquecimento e resfriadas, as vigas foram reparadas com laminados NSM (2000 mm x 20 mm), ao longo de sua estrutura, e utilizadas dois tipos de adesivos: adesivo de resina epóxi e adesivo à base de cimento. A Tabela 3 ilustra as variáveis do teste de vigas.

Tabela 3 – Distribuição das amostras ensaiadas

Grupo	ID	Amostras	Temperatura (°C)	Reforço NSM CFRP	Tipo de Adesivo
1	B-25C-1	1	25	Não	-
2	B-25C-2	1	25	Não	-
3	B-600-2H C	1	600	Não	-
4	B-700-2H C	1	700	Não	-
5	BRE-700-2H C - 1	1	700	Sim	Epóxi
6	BRE-700-2H C - 2	1	700	Sim	Epóxi
7	BRC-700-2H C - 1	1	700	Sim	Cimentício
8	BRC-700-2H C - 2	1	700	Sim	Cimentício

Fonte: Al-Jadooe et al. (2017).

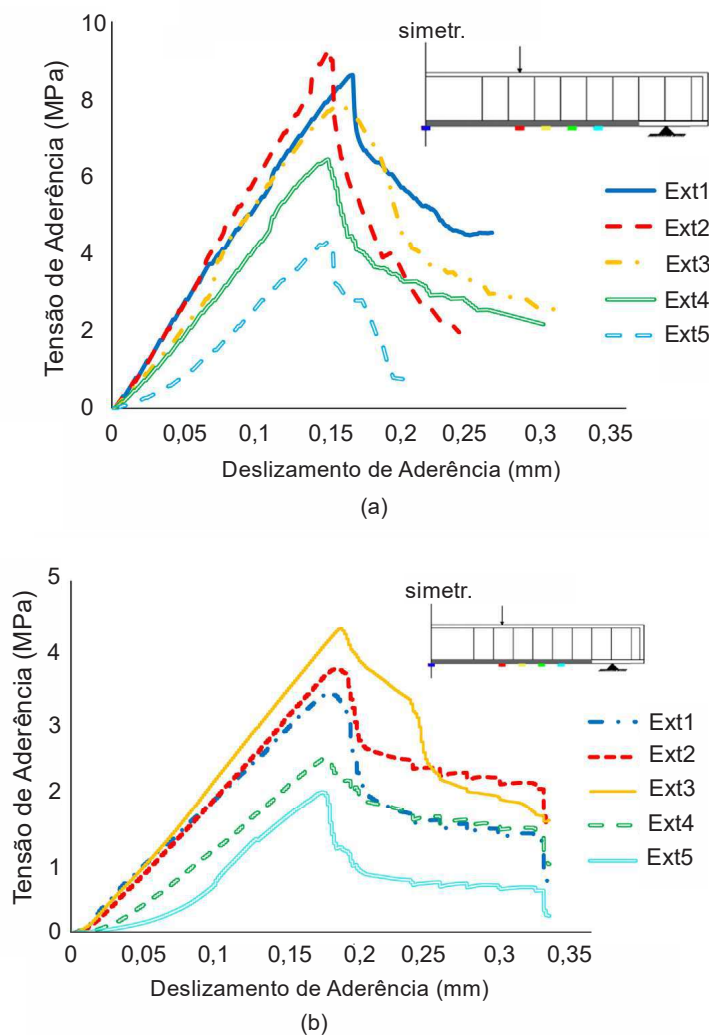
Conforme os experimentos propostos, foi evidenciado falha dúctil de flexão nas vigas de controle e danificadas pelo calor. Visto que no local da flexão as fissuras eram aumentadas ao decorrer do aumento de carga, na região de maior momento. Ademais, após deformação plástica do aço é visível uma fissura vertical de flexão na estrutura, ocasionando ao colapso do concreto na zona de compressão. Na viga de controle, ocorreu o esperado, deformação plástica (escoamento) das armaduras tracionadas e logo o esmagamento do concreto. Para a viga aquecida a 700 °C, as fissuras foram localizadas na região de flexão pura.

As vigas após aquecidas, foram reparadas com CFRP, em um cenário utilizando adesivo epóxi, em outro uso do adesivo a base de cimento, a fim de unir duas tiras de NSM CFRP às vigas danificadas na zona de tração. Ambos os adesivos utilizados para reparo das vigas evidenciaram serem métodos promissores, pois registraram valores superiores aos da viga de controle cerca de 23%, em relação ao surgimento das fissuras sob carregamento a flexão. Sendo a carga da viga de controle (viga não aquecida e sem CFRP) com aproximadamente 35 kN para o surgimento de fissuras, e

para as estruturas pós aquecimento, com emprego do adesivo epóxi e cimento com CFRP, as fissuras iniciais expuseram com carga de 43 kN.

O modo de falha entre as estruturas reparadas com CFRP e adesivo à base de cimento é comparável ao dos adesivos epóxi. Nas vigas reforçadas com CFRP é possível observar a separação do cobrimento de concreto ao decorrer que se aproxima da capacidade última. A separação ocorre justamente na região dos cortes das faixas de CFRP, e se propagou até o meio da viga, acarretando a ruptura a compressão do concreto.

Figuras 8 – Relação tensão-deslizamento de aderência local para diferentes corpos de prova: a) BRE-700-2H e b) BRC-700-2H



Fonte: Adaptado de Al-Jadooe et al. (2017).

As curvas locais de tensão-deslizamento da aderência das vigas após aquecimento de 2 horas, utilizando epóxi (BRE-700-2H) e utilizando cimento (BRC-700-2H), foram calculados por meio da leitura de extensômetros inseridos ao longo do comprimento de ligação. As curvas de deslizamentos de ligação do espécime BRE-700-2H e do espécime BRC-700-2H, foram plotados (Figuras 8a e 8b, respectivamente). Os resultados apontam a eficiência superior quando as vigas são reparadas com adesivo epóxi, pois neste caso, as peças suportam maior carga e registram menor deslizamento de aderência, em comparação com vigas reforçadas utilizando cola cimentícia.

Tabela 4 – Capacidade de carga final das amostras

ID	Carga final (kN)
B-25C-1	115,5
B-25C-2	114,3
B-600-2H C	108,9
B-700-2H C	100,6
BRE-700-2H C - 1	135,5
BRE-700-2H C - 2	133,8
BRC-700-2H C - 1	120,5
BRC-700-2H C - 2	119,3

Fonte: Al-Jadooe et al. (2017).

Através do diagrama carga-deflexão foi obtido características sobre capacidade de carga (Tabela 4) e rigidez das amostras após exposição à elevadas temperaturas, em sequência realizado reparo. Diante desse contexto, as vigas reforçadas com laminado NSM CFRP retomaram até 135 e 120% da capacidade de carga final da amostra aquecida. Em relação aos tipos de técnica de reparo, todas propostas evidenciaram eficiência para recuperação da capacidade de carga. No entanto, as vigas reparadas com laminado NSM CFRP com adesivo epóxi apresentaram maior capacidade de

carga em contrapartida as reparadas com adesivo a base de cimento, com uso de adesivo. Além disso, a pesquisa de Al-Jadooe et al. (2017) destacou que juntamente com esse aumento da capacidade de carga final, também ocorreu aumento positivo na rigidez peça, evidenciando a recuperação da rigidez nas vigas danificadas após a exposição a 700 °C devido à contribuição das tiras de CFRP utilizando ambos adesivos.

2.3 Al-Jadooe et al. (2018)

Os autores apresentaram um estudo experimental e numérico de 12 vigas de concreto armado. Dentre as vigas, duas para controle e as demais submetidas ao aquecimento, conforme a curva de incêndio padrão ISO-834, todas as vigas com as mesmas dimensões (140 mm x 260 mm x 2700 mm) com objetivo de analisar o comportamento à flexão após exposição à 700°C e 800 °C, com e sem isolamento na superfície superior do concreto, durante duas horas. Quatro vigas após o dano do aquecimento não foram reforçadas, no entanto três restantes foram reforçadas com laminados (2000 mm x 20 mm) de polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP), ao longo do comprimento da viga. A disposição das vigas é possível observar na Tabela 5.

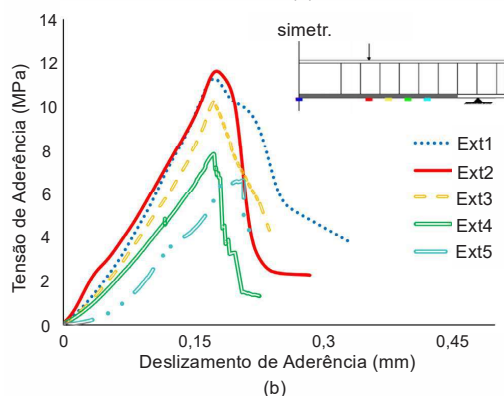
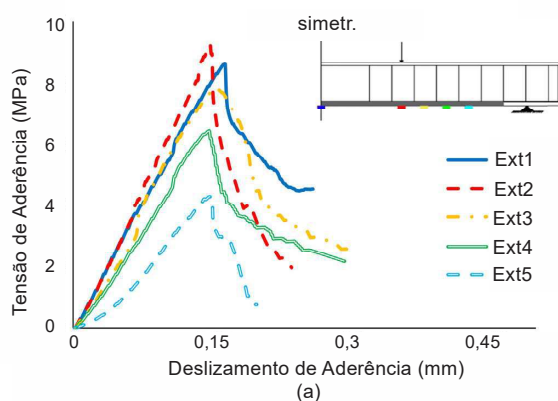
Tabela 5 – Distribuição das amostras ensaiadas

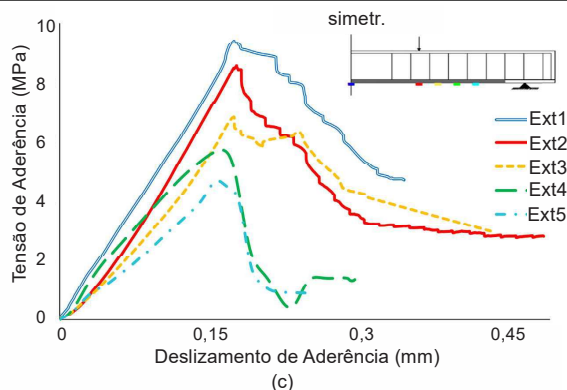
ID	Amostras	Temperatura (°C)	Reforço NSM CFRP	Isolamento na superfície	Tipo de Adesivo
CB	2	25	Não	Não	-
B-700-2H	1	700	Não	Não	-
B-PI-700-2H	1	700	Não	Sim	-
B-800-2H	1	800	Não	Não	-
B-PI-800-2H	1	800	Não	Sim	-
BRE-700-2H	2	700	Sim	Não	Epóxi
BRE-PI-700-2H	2	700	Sim	Sim	Epóxi
BRE-PI-800-2H	2	800	Sim	Sim	Epóxi

Fonte: Adaptado Al-Jadooe et al. (2018).

Os resultados concluíram que os padrões de fissuras e modo de falha são semelhantes ao relatado no trabalho Jadooe (2017) referente as vigas de controle e após aquecimento. No caso Jadooe (2018), é realizável destacar que os corpos de provas expostos a 800 °C acometem fissuras mais severas que sujeitado à 700°C. A típica falha dúctil de flexão é observada na viga de controle e nas vigas com a exposição a 700 °C e 800 °C, com isolamento parcial. Contudo, na viga exposta a 800 °C sem isolamento presenciou falha repentina em razão da perca das propriedades mecânicas do concreto nesta temperatura, sendo afetada por fissuras de flexão, com aumento da carga, se propagaram para região superior de maior momento.

Figuras 9 – Relação tensão-deslizamento média de aderência local para corpos de prova diferentes: a) BRE-700-2H, b) BRE-700-PI-2H e c) BRE-800-PI-2H





Fonte: Adaptado de Al-Jadooe et. al. (2018).

Os experimentos apontam que não houve aderência perfeita entre a fibra e concreto reparado. As curvas de tensão-deslizamento da ligação local dos corpos de prova após o dano ao calor, por duas horas, à 700 °C sem isolamento (BRE 700-2H), com isolamento (BRE-700-PI-2H) e à 800 °C com isolamento (BRE-800-PI-2H), posteriormente reparadas com a fibra de CFRP com uso de adesivo epóxi, foram calculados através das leituras dos extensômetros implementadas ao decorrer comprimento da ligação.

Diante do contexto anterior, as curvas de deslizamento para os espécimes BRE-700-2H, BRE-700-PI-2H e BRE-800-PI-2H foram traçadas, de acordo com nas Figs. 9a –9c, respectivamente. Devido a simetria da geometria e da carga, somente meia viga foi modela, como mostra na representação das imagens. Dessa forma, é possível explanar que as vigas com isolamento apresentam melhor desempenho de aderência, com tensão superior e menor deslocamento do comprimento de deslizamento, em comparação as vigas sem revestimento. Entretanto, ao aumentar a temperatura dos espécimes com revestimento, o desempenho da aderência é significativo.

O trabalho de Jadooe et al. (2018) resultou o diagrama carga-deflexão, com isso conclui-se acerca do desempenho da capacidade de carga e rigidez das vigas de controle, danificadas pelo calor, reforçadas e reparadas. Desse modo, registrou queda da capacidade de carga residual das vigas após

aquecimento a 700 e 800 por duas horas, em comparação as amostras de controle. As vigas reforçadas com laminado NSM CFRP e sem isolamento após aquecimento de 700 °C conseguiram readquirir até 135% da carga máxima em comparação com a capacidade de carga última das vigas aquecidas sem reparo. Contudo posterior exposição a 700 °C e 800 °C utilizando isolamento parcial recuperaram até 148% e 133%, e constatou-se o aumento na rigidez das peças.

2.4 Haddad e Yaghmour (2020)

Neste trabalho realizaram o reforço à flexão de onze vigas de concreto armado (150mm x 250mm x 1400mm) com introdução de laminados de CFRP (15 mm x 2,5 mm) ao longo das peças, usando a técnica SNSM (*side near-surface mounted*) abrangendo diferentes perfis (Figura 10) de aplicação (reta, parabólica e trapezoidais), após a danificação das estruturas ao calor em temperaturas de (400 °C e 500 °C), por três horas, em seguida submetidas a resposta mecânica sob configuração de teste de carga de quatro pontos (Figura 11). Na Tabela 6 é possível observar a distribuição das vigas de acordo com perfil e temperatura ao calor submetida.

Figuras 10 – Reforço à flexão usando a técnica SNSM

Perfil parabólico



Perfil trapezoidal

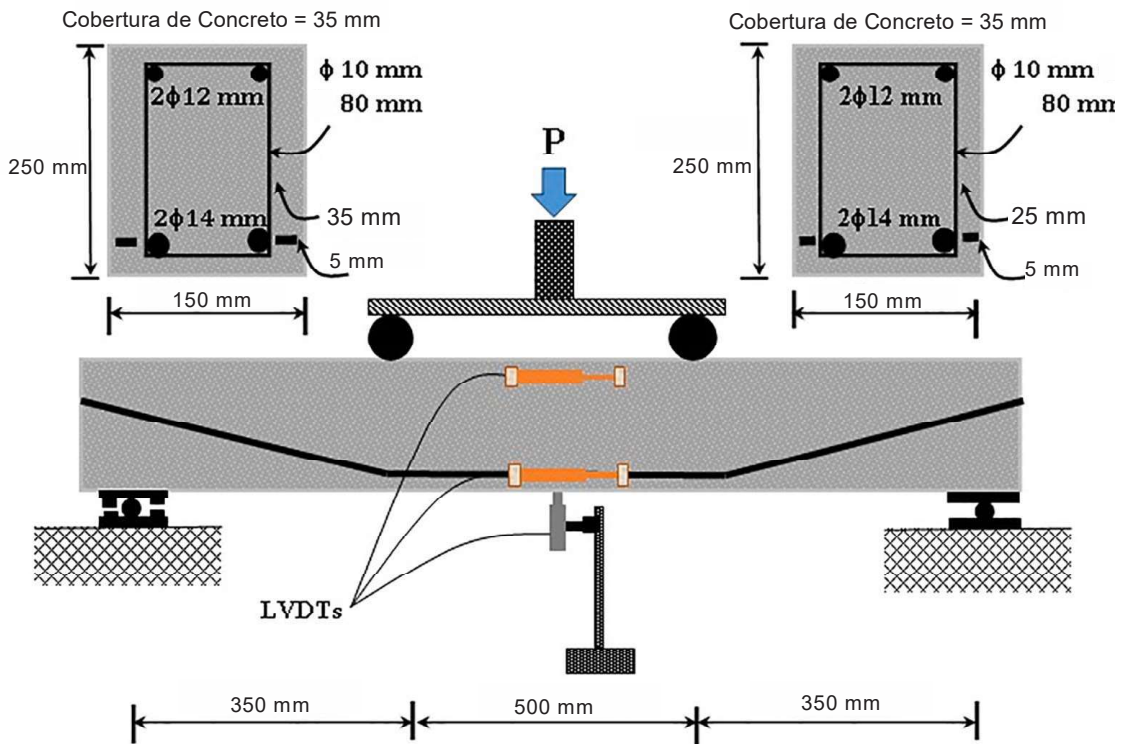


Perfil reto



Fonte: Adaptado de Haddad e Almasaeid (2020)

Figuras 11 – Detalhe do ensaio de flexão da viga



Fonte: Adaptado de Haddad e Almasaeid (2020)

Tabela 6 – Distribuição das vigas ensaiadas

ID	Forma de Perfil	Temperatura	Reforço SNSM
		(°C)	CFRP
C	Nenhum	23	Não
HD400	Nenhum	400	Não
HD400-TZ15-C25	Trapezoidal ângulo 15°	400	Sim
HD400-P-C25	Parabólico	400	Sim
HD400-TZEx15-C25	Reta externa ângulo 15°	400	Sim
HD500	Nenhum	500	Não
HD500-TZ15-C25	Trapezoidal ângulo 15°	500	Sim
HD500-TZ20-C25	Trapezoidal ângulo 20°	500	Sim
HD500-P-C25	Parabólico	500	Sim
HD500-TZEx15-C25	Reta externa ângulo 15°	500	Sim
HD500-S-C25	Linha reta	500	Sim

Fonte: Adaptado de Haddad e Yaghmour (2020).

As vigas de controle e expostas ao calor apresentam modo de falha por flexão. As fissuras da viga de controle (C) se iniciam quando a carga atinge 56 kN, e ao decorrer que a carga aumenta as fissuras aparecem na região de alto cisalhamento. A medida que a carga aumentava, as fissuras se estendiam para zona de compressão onde ocorreu o esmagamento explosivo, no ponto da ruptura constando uma carga de 187 kN. No caso das vigas pós exposição à 400 °C (HD400), as fissuras iniciaram na zona de alto momento com carga de 69kN e ruptura por flexão a 166 kN. As fissuras de flexão para as RHD400-TZ15-C25, RHD400-P-C25 e RHD400-TZEx15-C25 são iniciadas na zona intermediária com cargas de 140, 113 e 98 kN, respectivamente. Nas vigas RHD400-TZ15-C25 e RHD400-TZEx15-C25, as fissuras se espalham pela zona de alta tensão e cisalhamento em direção à zona de compressão até a ruptura da estrutura com 281 e 309 kN, respectivamente. A viga RHD400-P-C25 obteve um comportamento similar antes de ser acometida pela separação do cobrimento de concreto na região das tiras de SNMS CFRP, ocasionando mudança no eixo neutro do concreto, até seu colapso.

Para as vigas pós-exposição à 500 °C (HD500), as fissuras iniciaram diagonalmente próximo aos apoios carga de 59kN e posteriormente se estendem para zona de alto momento com o aumento da carga, até a ruptura, registrada por flexão a 129 kN. As fissuras para as vigas RHD500-TZ15-C25 e RHD500-TZ20-C25 começam na zona intermediária a 145 e 150 kN, respectivamente, e se espalham após para região de maior cisalhamento em cargas superiores. Antes de colapsar a peça, RHD500-TZ15-C25 falha por separação do cobrimento de concreto próximo da armadura de aço, enquanto a viga RHD500-TZ20-C25 destaca ruptura típica por flexão. Tratando-se das vigas RHD500-S-C25 e RHD500-TZEx15-C25, as trincas iniciam acima na zona a direita com cargas de 97 e 120 kN antes de aparecerem na zona de alto momento. A separação do cobrimento do

concreto ocorre nas cargas abaixo de 181 e 219 kN, no nível da armadura de aço de tração, ocasionando a ligeira propagação de trincas dentro da zona de alto cisalhamento, finalizando na ruptura frágil por cisalhamento. Por fim, a viga RHD500-P-C25 fissura com carga típica a 126 kN por flexão seguida por cisalhamento. À medida que a carga eleva as fissuras se espalham levando a ruína da viga com carga relativamente alta de 257 kN.

Tabela 7 – Comportamento mecânico das vigas

ID	Rigidez	Carga Final
-	(MN/m)	(kN)
C	100%*	187
HD400	89%	166
HD400-TZ15-C25	150%	281
HD400-P-C25	158%	295
HD400-TZEx15-C25	166%	309
HD500	69%	128
HD500-TZ15-C25	143%	267
HD500- TZ20-C25	138%	258
HD500-P-C25	138%	257
HD500-TZEx15-C25	117%	219
HD500-S-C25	141%	181

Fonte: Adaptado de Haddad e Yaghmour (2020).

O estudo de Haddad e Yaghmour (2020) também apresentou resultados mediante ao desempenho da rigidez (Tabela 7) e da capacidade de carga das amostras. Com isso, após o aquecimento dos corpos de prova foi constatado a redução da capacidade de carga e da rigidez das peças, em contrapartida houve aumento de ambos, após o reforço na maior parte das amostras. Em relação aos diferentes tipos de reparos, com uso da técnica SNSM CFRP, os perfis trapezoidais externos e internos se destacaram por obterem maior ganho de capacidade de carga e rigidez.

2.5 Haddad e Harb (2021)

Desenvolveram uma série experimental com o mesmo sistema SNSM realizado no trabalho de Haddad e Yaghmour (2020), mas utilizando barras circulares e angulações (quando necessário) do perfil do reforço diferenciado. Ambos os trabalhos submetem as vigas a temperaturas até 500°C e então reforçaram. Haddad e Harb (2021), utilizaram dez vigas de concreto armado (150 mm x 250 mm x 1400 mm) dimensionadas a fim de sofrer ruptura por flexão sob carga de quatro pontos após serem moldadas e curadas por 60 dias e separadas em três grupos. Grupo 1: vigas intactas; grupo 2 pós-aquecidas (a 400°C e 500°C); e grupo 3: sete vigas reparadas com diferentes tipos de perfis, cinco delas reparadas por meio de cordas SNSM CFRP (10 mm de diâmetro), inserida ao longo do comprimento da peça, após aquecimento das peças. Tabela 8, visualizar as designações das amostras.

Tabela 8 – Distribuição das amostras ensaiadas

ID	Perfil	Temperatura (°C)
C-C25	Nenhum	23
HD400-C25	Nenhum	400
RHD400-TZ20-C25	Trapezoidal-Ângulo 20°	400
RHD400-ITZ20-C25	Ângulo trapezoidal interno 20°	400
RHD400-P-C25	Parabólico	400
RHD400-S-C25	Linha reta	400
HD500-C25	Nenhum	500
RHD500-TZ20-C25	Trapezoidal-Ângulo 20°	500
RHD500-ITZ20-C25	Ângulo trapezoidal interno 20°	500
RHD500-P-C25	Parabólico	500

Fonte: Adaptado Haddad e Harb (2021).

O programa experimental constatou falha dúctil por flexão para as vigas de controle (C-C25) e danificadas ao calor (HD400 e HD500). A viga de

controle iniciou as fissuras na zona de maior momento a 34 kN se propagaram a região com maior cisalhamento com cerca de 82 kN e logo se espalhou para zona de compressão, ocasionando o esmagamento do concreto comprimido, junto com uma deflexão. As vigas expostas ao calor a 400 °C e 500 °C, as fissuras surgiram em 62 e 53 kN na zona de alto momento anterior a distribuição em direção à zona de alto cisalhamento em cargas mais altas, respectivamente. Em relação a vigas com os reparos, as fissuras de flexão surgem no local de maior momento para as vigas RHD400-TZ20- C25, RHD400-ITZ20-C25 e RHD400-P-C25 com cargas de 45, 42 e 60 kN, respectivamente, posteriormente surgindo para áreas de alto cisalhamento, até propagar as rachaduras para zona de compressão e quanto as tensões de flexão aumentavam ocasionou na ruptura dos cabos de CFRP e levou ao desenvolvimento de forças de rupturas possível para causa separações nas coberturas laterais do concreto. Diante disso, o cabo sofreu redução o que tornou a ocorrer a falha por cisalhamento. No entanto, tem-se a viga RHD400-S-C25 que apresentou diferentes modos de falha, nela as fissuras foram iniciadas na zona intermediária a 55 kN, antes de se propagar para zona de alto cisalhamento à medida que as cargas aumentavam. As fissuras se estendem em direção à zona de compressão até a ruptura do cabo CFRP. O colapso do concreto ocorreu por falha de flexão, devido à pressão de ruptura do CFRP acontecer na parte inferior da viga, não alterando a geometria da peça de maneira significativa.

Em se tratando das vigas reparadas após o aquecimento à 500 °C, são registradas fissuras iniciadas na zona de alto momento. As vigas RHD500- TZ20-C25, RHD500-ITZ20-C25 e RHD500-P-C25, com carga de 63, 55 e 73 kN, respectivamente, para o início das fissuras. No colapso da peça é visto que as fissuras se propagam rapidamente da zona de cisalhamento com direção à zona de compressão, acarretando a ruptura do cabo de NSM CFRP, com isso a separação do cobrimento lateral próximo da ruptura, tornando o esmagamento por cisalhamento em vez da flexão.

Os programas experimentais de Haddad e Harb (2021) constataram que os diferentes tipos de perfis de CFRP melhoraram o desempenho da capacidade de carga das vigas danificadas e reparadas após as altas temperaturas, em contrapartida ocorreu redução da rigidez das peças. Dentre os perfis, o parabólico da corda de CFRP evidenciou melhor qualidade no desempenho, em segundo os perfis trapezoidal interno e externo, e por fim, o perfil reto para o cabo CFRP. Vale ressaltar, que a eficiência no desempenho da capacidade de carga e rigidez foram reduzidas devido ao impacto negativo da exposição das vigas de concreto a elevadas temperaturas.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio dos estudos apresentados na seção anterior, “Estado da Arte”, foram possíveis observar a influência do CRFP (inseridos pela técnica de NSM ou SNSM) nas vigas de concreto após altas temperaturas. As seguintes conclusões podem ser feitas:

- As vigas de concreto dimensionados para romper ao cisalhamento, após aquecidas e depois reforçadas externamente ao cisalhamento, aumentam a aderência entre o aço de reforço e o concreto (carga no deslizamento), esse aumento depende diretamente do nível de dano e do espaçamento entre os laminados. Desse modo, a redução do espaçamento entre os laminados de CFRP favorece a elevação do pico da curva aderência-deslizamento das vigas reparadas.
- As vigas danificadas ao calor seguidas do reparo ao cisalhamento com tiras NSM-CFRP foram eficazes para evitar ou retardar a falha por escorregamento entre o aço convencional e o concreto deteriorado. Dessa maneira, amenizando ou anulando o modo de ruptura flexural. As estruturas reparadas com NSM-CFRP à flexão após aquecimento de 700°C, por duas horas, utilizando adesivo

epóxi e a base de cimento respondem bem a eficiência à aderência. No entanto, ao comparar os resultados do gráfico tensão-deslizamento, de ambos os adesivos, o adesivo epóxi apresentou melhores resultados em relação à cola de cimento, pois apresentou maiores picos na curva tensão-deslizamento.

- O tipo de modo de falha ocorre a depender da disposição da viga. Sendo apresentadas situações vigas em temperatura ambiente, danificadas ao calor, e posteriormente reforçadas com adesivo epóxi ou a base de cimento. Para cada cenário destrinchado o modo de falha é característico: escoamento do aço e falha por compressão; deformação plástica do aço e posterior falha por compressão com aumento do número de fissuras; separação do revestimento de concreto, escoamento do aço e falha por compressão; e separação parcial do revestimento seguida de ruptura do aço, respectivamente.
- Peças pós-aquecimento reforçadas com NSM-CFRP, com e sem revestimento influenciam no modo de falha. Sendo assim, as vigas aquecidas a 700 °C, reparadas com NSM-CFRP sem isolamento, tem-se escoamento do aço e posterior falha por compressão a medida da elevação das fissuras, peças com isolamento, ocorre separação do revestimento de concreto, escoamento do aço e, posteriormente, ruptura por compressão. O aumento da temperatura de 700 °C para 800 °C manteve o tipo de falha constante, para ambos os cenários (estrutura com e sem isolamento).
- Por meio das curvas de tensão-deslizamento é possível destacar que espécimes pós aquecimento de mesma temperatura, reparados com NSM-CFRP, com isolamento indicam melhor aderência. As vigas com revestimento apresentaram tensão superior com menor deslizamento em relação a estruturas sem o isolamento. Mas

percebe-se, que vigas com isolamento que sofrem aumento da temperatura, a tensão é reduzida de forma significativa.

- Para as vigas reforçadas com SNSM a flexão, com tiras ou cabos de CFRP, ocorreu de algumas peças falhar por cisalhamento e não mais por flexão. A viga reparada com perfil de corda reta, sofreu ruptura por flexão, enquanto as demais, sofreram rupturas súbitas por cisalhamento devido a separação do cobrimento lateral com a ação do rompimento das cordas de CFRP. Ressaltando a importância do reforço ao cisalhamento após incêndio também.
- Os resultados evidenciam a distribuição de fissuras e os modos de falha, para vigas danificadas pelo calor, reparadas com SNSM utilizando tiras ou cabos de CFRP. As fissuras intensas se manifestam na superfície da estrutura inicialmente por flexão e ao elevar a carga, também surgem fissuras de cisalhamento. Quanto ao modo de falha, ela varia a depender do tipo de configuração perfis, mas percebe-se que geralmente o uso de perfis trapezoidais e parabólicos contribui para evitar a ruptura por cisalhamento e reduzir o aumento da separação do cobrimento de concreto nas vigas reforçadas.
- Em relação a capacidade de carga e rigidez das peças, foi possível concluir que em todos os estudos após o aquecimento das amostras ocorre a redução em seus respectivos desempenhos. Comparando as amostras trabalhadas com o espaçamento do reforço, vigas de menor espaçamento obtiveram maior capacidade de carga, em comparação a amostras sob mesma exposição de temperatura com maiores espaçamentos, e vigas após o reparo aumentaram a rigidez, quando anteriormente expostas até 300 °C. As vigas reparadas com laminado NSM CFRP com adesivo epóxi propuseram maior capacidade de carga em comparação com as vigas reparadas com laminado NSM CFRP com adesivo a base de

cimento. Além disso, os corpos de prova aquecidos e logo depois reparados com isolamento parcial apresentaram maior capacidade de carga, quando comparadas com vigas sem isolamento. Para os corpos de prova reparado com laminados utilizando a técnica SNSM CFRP, os perfis trapezoidais (externos e internos) apresentaram maior ganho de capacidade de carga e rigidez, e para as estruturas reforçadas com cabo, utilizando a mesma técnica, SNSM CFRP, o perfil parabólico da evidenciou melhor qualidade na recuperação da capacidade de carga.

- Portanto, por meio dos estudos abordados nesse trabalho, que tratam o aquecimento da peça superior a 500 °C, observa-se que após reforçadas ao cisalhamento as vigas não recuperam a sua rigidez, enquanto quando reparadas à flexão a recuperação da rigidez foi bem-sucedida.

Portanto, é possível concluir que para os diferentes cenários apresentados carga é melhorada com uso do CFRP, para vigas após elevadas temperaturas. No entanto, a depender da variável, como: tipo de adesivo, espaçamento do laminado de reparo, uso de isolamento no concreto, tipo de CFRP, faz com que afete desempenho da aderência, a especificação do modo de falha, eficiência do reforço capacidade de carga e rigidez da peça. Dessa maneira, é importante que mais estudos com essa temática sejam estudados, a fim de melhorar a eficiência pós reparo das vigas danificadas pelo calor, em prática, para cenários pós incêndios que necessitam da intervenção, com a finalidade de recuperar o uso da estrutura comprometida.

RECONHECIMENTO

Os autores agradecem ao apoio financeiro recebido da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco – FACEPE, no âmbito do projeto de

pesquisa contemplado pelo Edital 29/22 APQ Emergentes. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Reconhecendo o apoio da CAPES por fornecer bolsa de estudos à primeira autora.

REFERÊNCIAS

AL-SAAD, Nihad Tareq Khshain et al. A state-of-the-art review: Near-surface mounted FRP composites for reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, v. 209, p. 748-769, 2019.

ARRUDA, M. R.T et al. Numerical modelling of the bond between concrete and CFRP laminates at elevated temperatures. *Engineering Structures*, v. 110, p. 233-243, 2016.

COELHO, Mário RF; SENA-CRUZ, José M.; NEVES, Luís AC. A review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 93, p. 1157-1169, 2015.

COSTA, Leonardo Medeiros da et al. Applicability of the 500° C isotherm method in determining the strength of reinforced concrete beams after fire. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 15, 2021.

COSTA, Leonardo Medeiros da et al. Procedure for determining the strength to shear of reinforced concrete beams strengthened with NSM CFRP. *Materials and Structures*, v. 55, n. 3, p. 1-14, 2022.

COSTA, Leonardo Medeiros. **Reabilitação após incêndio de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com NSM CFRP**. 2022. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco (Brasil).

DIAS, Salvador José Esteves. **Investigação experimental e analítica no reforço ao corte de vigas de betão armado com a técnica da inserção de laminados de CFRP**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade do Minho (Portugal).

FIRMO, J. P. et al. Three-dimensional finite element modelling of the fire behaviour of insulated RC beams strengthened with EBR and NSM CFRP strips. **Composite Structures**, v. 183, p. 124-136, 2018.

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

HADDAD, Rami H.; HARB, Ali N. **CFRP ropes for retrofitting heat-damaged concrete beams**. Journal of Building Engineering, v. 43, p. 102522, 2021.

HADDAD, Rami H.; YAGHMOUR, Emad M. **Retrofitting Heat-Damaged concrete beams using different profiles of side NSM CFRP strips**. In: Structures. Elsevier, 2020. p. 2232-2243.

JADOOE, Awad; AL-MAHAIDI, Riadh; ABDOUKA, Kamiran. **Experimental and numerical study of strengthening of heat-damaged RC beams using NSM CFRP strips**. Construction and Building Materials, v. 154, p. 899-913, 2017.

JADOOE, Awad; AL-MAHAIDI, Riyadh; ABDOUKA, Kamiran. ***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, 2018.

JIANGTAO, Yu et al. The performance of near-surface mounted CFRP strengthened RC beam in fire. ***Fire Safety Journal***, v. 90, p. 86-94, 2017.

KHALIFA, Ahmed M. Flexural performance of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP strips. ***Alexandria Engineering Journal***, v. 55, n. 2, p. 1497-1505, 2016.

PRADO, Danilo Mascarenhas. ***Avaliação experimental de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com laminados de CFRP por meio de análise estática e modal***. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

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

YU, Jiangtao et al. A simplified method to predict the fire resistance of RC beams strengthened with near-surface mounted CFRP. ***Composite Structures***, v. 193, p. 1-7, 2018.