



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

KÉZIA BRASILINO DE SOUZA

**REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O REFORÇO APÓS INCÊNDIO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DE LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO**

Recife

2024

KÉZIA BRASILINO DE SOUZA

**REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O REFORÇO APÓS INCÊNDIO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DE LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Medeiros da Costa

Recife

2024

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

- S729r Souza, Kézia Brasilino de.
Revisão sistemática sobre o reforço após incêndio de vigas de concreto armado através de laminados de fibra de carbono / Kézia Brasilino de Souza, 2024.
86 f.: il.
- Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira.
Coorientador: Leonardo Medeiros da Costa.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2024.
Inclui referências.
1. Engenharia civil. 2. Reabilitação pós-incêndio. 3. Vigas de concreto armado. 4. Laminados de CFRP. 5. Revisão sistemática. I. Oliveira, Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de (Orientador). II. Costa, Leonardo Medeiros da (Coorientador). III. Título.

624 CDD (22. Ed.)

UFPE
BCTG / 2024 - 94

KÉZIA BRASILINO DE SOUZA

**REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O REFORÇO APÓS INCÊNDIO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DE LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em: 29/09/2024

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Antônio Acacio de Melo Neto
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência
Prof. Dr^a. Nailde de Amorim Coelho
Universidade Federal do Vale do São Francisco

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Paulo Marcelo Vieira Ribeiro
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço, imensamente a Deus, pois até aqui me ajudou o Senhor.

A minha família: minha mãe Wilzanete, meu pai Levi, minha irmã Mirian, meu irmão Levi Filho, minha Tia Lucinete, que sempre estiveram ao meu lado, me dando suporte e ajuda para que essa etapa se tornasse possível.

A Luís Felipe Cruz, pelo incentivo e apoio durante todo este processo.

A Anna Carolina Lopes pela recepção em Recife, e torná-la mais aconchegante.

Aos Profs. Drs. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira e Leonardo Medeiros da Costa, pela atenção, compreensão e apoio durante o processo de definição e orientação.

Aos meus colegas da UFPE, pelo companheirismo.

Aos membros da banca, que com paciência e disponibilidade, aceitaram contribuir em minha formação.

A CAPES, o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A FACEPE, pelo auxílio financeiro durante a execução do trabalho.

A todos meus amigos, que oraram e me incentivaram durante este período.

E a todos que contribuíram de alguma forma.

RESUMO

O fogo em estruturas de concreto armado (CA) reduz as suas propriedades mecânicas. Com isso, os elementos de CA necessitam de reabilitação pós-incêndio para o funcionamento pleno de suas funcionalidades iniciais estabelecidas na fase de concepção do projeto. Este estudo de revisão sistemática tem por objetivo principal identificar as principais respostas do desempenho mecânico de vigas de CA após danificadas pelo aquecimento e então reforçadas utilizando laminados de polímero reforçado com fibra de carbono, em inglês *carbon-fiber-reinforced polymers* (CFRP). Utilizou-se da metodologia PRISMA, do inglês *Transparent Reporting of Systematic Reviews and Meta-Analyses*, para confecção da revisão sistemática, com buscas nas bases de dados nos portais de periódicos: *Engineering Village*, Portal CAPES, *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*. Para seleção dos artigos, foram adotados critérios de seleção, que visavam filtrar os estudos experimentais de vigas de concreto armado após aquecimento e reforçadas com laminados de CFRP, publicados entre 1990 e 2023 (até setembro deste ano). Foram achados 1413 estudos, desses, somente 28 passaram para etapa da leitura na íntegra, resultando na seleção de 11 artigos para análise. Portanto, observou-se que o uso do reparo com laminados de CFRP, depois do dano ao fogo de vigas de CA, aumenta o desempenho mecânico das peças. No entanto, ainda existe uma lacuna do conhecimento acerca do tema, somente um trabalho estuda o comportamento das vigas com reforço pós fogo, considerando o forno no estado transiente de temperatura, entre os trabalhos, boa parte é direcionada ao reforço à flexão (82%), sendo somente dois estudos ao reforço ao cisalhamento (18%), e nenhum trabalho levando em consideração o reforço à flexão com regime de aquecimento com forno no estado transiente de temperatura. Por meio da revisão sistema, pode-se concluir que foi possível a recuperação da capacidade de carga das vigas de seção retangulares de CA, depois do fogo e reforçadas à flexão com laminados de CFRP, até a temperatura de 800 °C (com aumento de 15%), e para o reforço ao cisalhamento até o dano de mais de 1000 °C (com aumento de 12,5%), em relação à viga ambiente sem reforço. No entanto, para ambos os cenários não ocorreu a restauração da rigidez. Diante dos parâmetros evidenciados, tem-se: dano da temperatura, a técnica de reforço EBR/NSM e taxa de reforço, nessa ordem, como os mais influentes nos resultados do desempenho das vigas de CA.

Palavras-chave: reabilitação pós-incêndio, vigas de concreto armado, laminados de CFRP, revisão sistemática.

ABSTRACT

Fire in reinforced concrete (RC) structures reduces their mechanical properties. As a result, reinforced concrete elements require post-fire rehabilitation in order to fully perform their initial functions established at the design stage. The main objective of this systematic review study is to identify the main mechanical performance responses of RC beams after they have been damaged by heating and then reinforced using carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) laminates. The PRISMA methodology (Transparent Reporting of Systematic Reviews and Meta-Analyses) was used to carry out the systematic review, with searches in the databases of the journal portals: Engineering Village, CAPES Portal, Science Direct, Scopus and Web of Science. Selection criteria were adopted to filter out experimental studies of reinforced concrete beams after heating and reinforced with CFRP laminates, published between 1990 and 2023 (up to September of this year). A total of 1,413 studies were found, of which only 28 were read in full, resulting in the selection of 11 articles for analysis. Therefore, it was observed that the use of CFRP laminate repair after fire damage to RC beams increases the mechanical performance of the parts. However, there is still a gap in knowledge on the subject, with only one paper studying the behavior of beams with post-fire reinforcement, considering the furnace in the transient temperature state. Among the papers, a large part is aimed at flexural reinforcement (82%), with only two studies on shear reinforcement (18%), and no paper considering flexural reinforcement with a heating regime, with the furnace in the transient temperature state. From the review of the system, it can be concluded that it was possible to recover the load-bearing capacity of rectangular RC beams after fire and reinforced in bending with CFRP laminates, up to a temperature of 800 °C (with an increase of 15%), and for shear reinforcement up to damage of more than 1000 °C (with an increase of 12.5%), compared to the ambient beam without reinforcement. However, for both scenarios, stiffness was not restored. In view of the parameters shown, temperature damage, the EBR/NSM reinforcement technique and reinforcement rate are, in that order, the most influential on the performance results of the RC beams.

Keywords: post-fire rehabilitation, reinforced concrete beams, CFRP laminates, systematic review.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de incêndios nos países (2021).....	13
Figura 2 - Pilares e vigas de concreto armado comprometidos após incêndio.....	14
Figura 3 - Distribuição dos artigos por ano.	15
Figura 4 - Técnica de reparo.....	16
Figura 5 - Exportação extensão RIS.	19
Figura 6 - Criação de projeto.	19
Figura 7 - Nuvem de palavras-chaves.	20
Figura 8 - Tela de trabalho <i>Rayyan</i>	21
Figura 9 - Fluxograma do protocolo de busca.	22
Figura 10 - Distribuição dos artigos por países	23
Figura 11 - Distribuição das citações dos trabalhos elegíveis	24
Figura 12 - Modelo de reforço da vista superior e seção da viga.	26
Figura 13 - Curvas carga-deflexão experimentais a) com adesivo epóxi b) com adesivo à base de cimento.....	27
Figura 14 - Modos de falha de algumas vigas CA a) Para a viga ambiente b) Para a viga aquecida a 700 C, c) viga reforçada com CFRP	28
Figura 15 - Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Jadooe et al. (2017).....	29
Figura 16 - Modelo do reforço nas vigas a) vista frontal b) vista superior e seção da viga	30
Figura 17 - Modelo aderência-deslizamento encontrado experimentalmente.....	32
Figura 18 - Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Haddad e Almomani (2017).....	33
Figura 19 - Percentual da capacidade de rigidez residual das vigas ensaiadas de Haddad e Almomani (2017).....	33
Figura 20 - Esquema da distribuição dos laminados de NSM-CFRP ao longo do vão da viga.....	34
Figura 21 - Fissuração e modo de falha para vigas danificadas a 500 e 600 °C e reparadas com laminados de CFRP	35
Figura 22 - Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Haddad e Almasaeid (2016).....	36
Figura 23 - Percentual da capacidade de rigidez residual das vigas ensaiadas de Haddad e Almasaeid (2016).....	37
Figura 24 - Carga e deflexão no meio do vão.....	39

Figura 25 - Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Jadooe et al. (2018a).....	40
Figura 26 - Modelo reforço das amostras	41
Figura 27 - Curva carga-deflexão	42
Figura 28 - Modos de falha.....	43
Figura 29 - Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Ashteyat et al. (2020).....	44
Figura 30 - Curva carga-deflexão	46
Figura 31 - Modo de falha	46
Figura 32 - Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Jadooe et al. (2018b).....	47
Figura 33 - Modelos do reforço na viga	48
Figura 34 - Relações carga-deflexão no meio do vão de vigas expostas a 700 °C	49
Figura 35 - Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Lenwari et al. (2020).....	50
Figura 36 - Ranhura em diferentes perfis	51
Figura 37 - Modos de falha.....	52
Figura 38 - Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Haddad e Yaghmour (2020).....	54
Figura 39 - Percentual da capacidade de rigidez residual das vigas ensaiadas de Haddad e Yaghmour (2020).....	54
Figura 40 - Desenho esquemático das configurações de reparo: a) Laminados único concentrada no intradorso (S1), b) Dois laminados nas laterais, um de cada lado (S2).	55
Figura 41 - Modelo aderência-deslizamento encontrado experimentalmente.....	56
Figura 42 - Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Barham et al. (2022).....	57
Figura 43 - Percentual da capacidade de rigidez residual das vigas ensaiadas de Barham et al. (2022).....	58
Figura 44 - Reforço da viga.....	59
Figura 45 - Modelo aderência-deslizamento encontrado experimentalmente.....	61
Figura 46 - Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Costa et al. (2023).....	62

Figura 47 - Percentual da capacidade de rigidez residual das vigas ensaiadas de Costa et al. (2023).....	63
Figura 48 - Modelo de reforço a) Vista inferior da viga e seção b) Vista lateral da viga e seção	64
Figura 49 - Modo de falha	65
Figura 50 - Percentual de recuperação capacidade de carga das vigas	65
Figura 51 - Percentual da recuperação capacidade de rigidez das vigas	66
Figura 52 - Distribuição das vigas ensaiadas nos artigos elegíveis conforme o modo de falha	67
Figura 53 - Modos de falha por descolagem na ligação	79

LISTA TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do Protocolo definidos para a pesquisa	21
Tabela 2 – Trabalhos elegíveis	23
Tabela 3 – Identificação de amostras do trabalho de Jadooe et al. (2017)	26
Tabela 4 – Identificação de amostras do trabalho de Haddad e Almomani (2017)	31
Tabela 5 – Identificação de amostras do trabalho de Haddad e Almasaeid (2016)	34
Tabela 6 – Identificação de amostras do trabalho de Jadooe et al. (2018a)	38
Tabela 7 – Identificação de amostras do trabalho de Asheteyat et al. (2020)	42
Tabela 8 – Identificação de amostras do trabalho de Jadooe et al. (2018a)	45
Tabela 9 – Identificação de amostras do trabalho de Lenwari et al. (2020)	49
Tabela 10 – Identificação de amostras do trabalho de Haddad e Yaghmour (2020)	51
Tabela 11 – Identificação de amostras do trabalho de Barham et al. (2022)	55
Tabela 12 – Identificação de amostras do trabalho de Costa et al. (2023)	60
Tabela 13 – Identificação de amostras do trabalho de Haddad e Almasaeid (2016)	64
Tabela 14 – Parâmetros das amostras ensaiadas	72
Tabela 15 – Fator de eficiência de vigas pós-aquecidas e depois reparadas com NSM CFRP em diferentes espaçamentos.	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
CA	Concreto armado
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
CNR	<i>National Research Council</i>
CSA	<i>Canadian Standards Association</i>
CTIF	<i>Center of Fire Statistics</i>
EBR	<i>Externally-Bonded Reinforced</i>
FACEPE	Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de PE
FIB	<i>Fédération Internationale du Béton</i>
FRP	<i>Fiber Reinforced Polymer</i>
IAFRS	<i>International Association of Fire and Rescue Services</i>
ISB	<i>Instituto Sprinkler Brasil</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NBR	Norma Brasileira
NSM	<i>Near-surface mounted</i>
PO	<i>Peeling-off</i>
PRISMA	<i>Transparent Reporting of Systematic Reviews and Meta-Analyses</i>
RCB	<i>Reinforced Concrete Beam</i>
RIS	<i>Research Information Systems</i>
RST	Revisão Sistemática de Literatura
RT	Seção retangular
SIA	<i>Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein</i>
SNSM	<i>Side near-surface mounted</i>
T	Seção em T
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

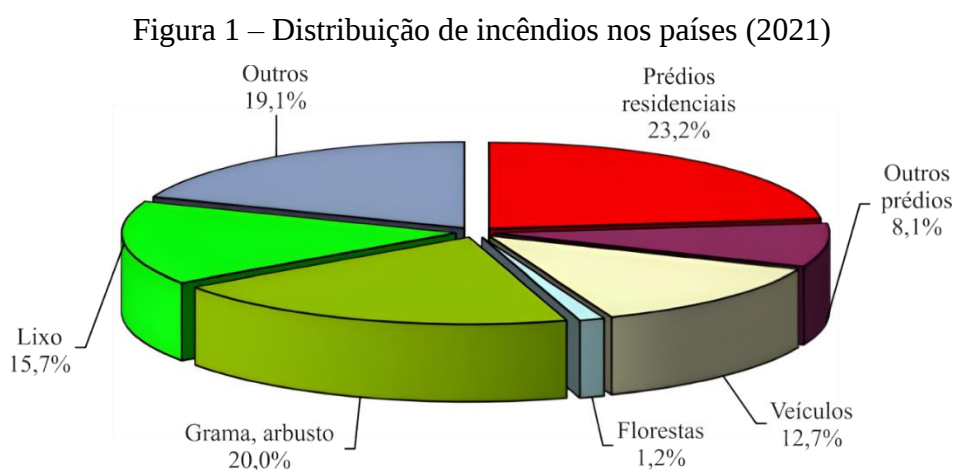
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	ESTRUTURA DO TEXTO.....	17
2	REVISÃO SISTEMÁTICA	18
3	ESTADO DA ARTE	25
3.1	RESUMO DOS ARTIGOS ELEGÍVEIS	25
3.1.1	Jadooe et al. (2017a)	25
3.1.2	Haddad e Almomani (2017)	29
3.1.3	Haddad e Almasaeid (2016)	33
3.1.4	Jadooe et al. (2018a)	37
3.1.5	Ashteyat et al. (2020)	41
3.1.6	Jadooe et al. (2018b)	45
3.1.7	Lenwari et al. (2020)	47
3.1.8	Haddad e Yaghmour (2020).....	50
3.1.9	Barham et al. (2022)	55
3.1.10	Costa et al. (2023).....	58
3.1.11	Obaidat et al. (2023)	63
4	DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS	67
4.1	CAPACIDADE DE CARGA E RIGIDEZ	67
4.2	MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DAS VIGAS	73
4.2.1	Resistência após incêndio de vigas de concreto armado	73
4.2.2	Reforço ao cisalhamento NSM laminados CFRP	74
4.2.3	Reforço à flexão NSM CFRP laminados na parte inferior da viga.....	75
4.2.4	Reforço à flexão SNSM CFRP laminados nas laterais da viga	77
4.3	MODO DE FALHA	78
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS.....	80
5.1	CONCLUSÃO.....	80
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	80
	REFERÊNCIAS.....	82

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

É sabido as ocorrências de incêndios em todo o mundo. Um estudo mundial de destaque foi feito pela *International Association of Fire and Rescue Services* (IAFRS), em Tradução significa, Associação Internacional de Serviços de Combate a Incêndio e Salvamento, por meio do *Center of Fire Statistics* (CTIF, 2023), contendo dados de 38 países, sobre as estatísticas de incêndios do ano de 2021. No total foram 3.153.108 incêndios registrados, destacando a predominância de incêndios em edificações (prédios residenciais e outros prédios), apresentando a soma de maior percentual (31,3%), em comparação aos demais motivos, ver Figura 1.



Fonte: CTIF. (2023)

A ocorrência de incêndios promove prejuízo a sociedade ocasionando perdas materiais e imateriais. No Brasil destacam-se casos de incêndio de grande repercussão, como: a boate *Kiss* – RS, (2013), Ultracargo de Santos – SP (2015), o museu Nacional – RJ, alojamento do flamengo – RJ (2019), Santa Casa de Belo Horizonte (Hospital) – MG (2022) e o incêndio na Fábrica da Cacau Show (2023) – ES.

Neste cenário, é importante salientar que elevadas temperaturas proporcionam a redução do desempenho de estruturas de concreto em suas condições de serviço e estados limites últimos (Demir et al., 2020). Vigas de CA danificadas pelo fogo tem capacidade de carga reduzida com elevação da temperatura (Irshidat e Al-Saleh, 2017), (Esfahani, et al., 2021) e com aumento da

exposição ao calor (Liu, et al., 2023). Com isso, faz-se preciso que estruturas após dano ao fogo (Figura 2) realizem reparo, reforço ou reabilitação.

Figura 2 – Pilares e vigas de concreto armado comprometidos após incêndio



Fonte: blogsci.com.br (2024)

Embora a NBR 15200 (2012) afirme que a resistência à compressão do concreto e ao escoamento do aço são desproporcional a elevação da temperatura, não há norma brasileira que trate das determinações das resistências residuais das estruturas, e muito menos da capacidade resistente dessas estruturas, após reforço. Além disso, o Brasil não possui regulamento para reforço a temperatura ambiente.

No entanto, existem diretrizes e códigos, internacionais direcionados ao reforço a temperatura ambiente. Destaca-se alguns códigos de dimensionamento: SIA 166 (2004), CNR-DT 200 R1 (2013), CAN/CSA-S806-12 (2017), ACI 440 2.R (2017) e FIB Bulletin 90 (2019). Diante disso, faz-se necessária uma solução de reforço pós incêndio para restaurar a capacidade resistente inicial da estrutura.

Para pontuar as intervenções aplicadas a elementos de concreto armado, as definições dos termos adotados, reparo, reforço e reabilitação, descritos neste trabalho são consoantes a norma americana (ACI 562, 2019). O reparo se refere a reconstrução ou renovação do concreto total ou sua fração, referente a uma estrutura existente, com objetivo de manutenção ou correção de deterioração. Ele se dá por devolver a integridade estrutural da peça. Exemplo: aplicação de adesivo epóxi ou a base cimentícia, na superfície da peça de concreto armado.

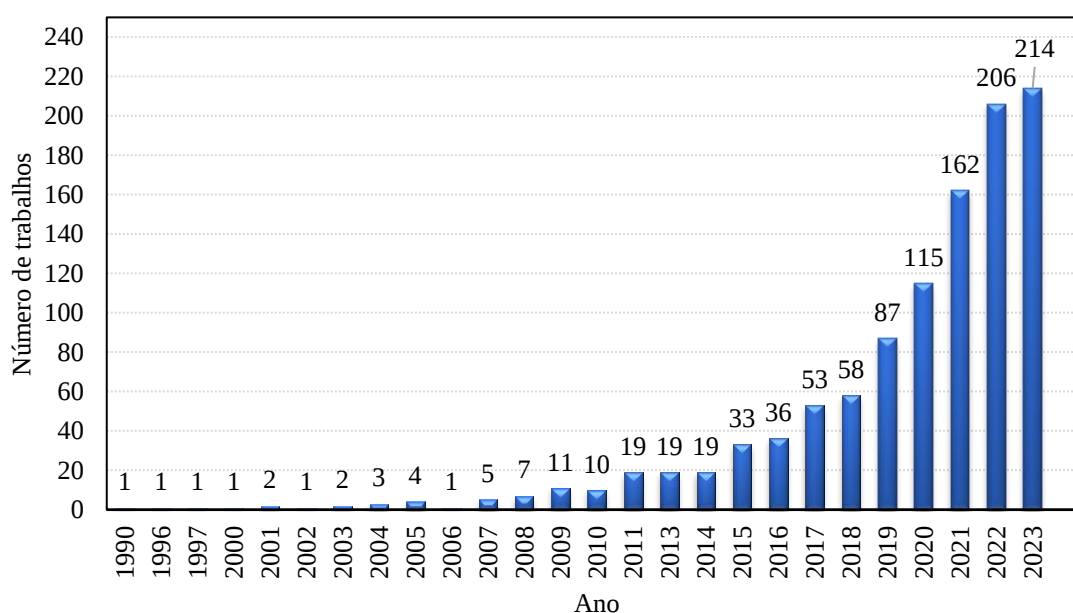
Ademais, o Reforço tem como finalidade elevar a capacidade de carga de uma estrutura existente ou parte dela. Exemplo: aplicação de barras ou placas de aço à peça estrutural, em certos casos, necessitando da adição de barras de maiores dimensões, para atingir a capacidade de carga desejável, tornando a seção estrutural mais robustas e até inviável para o local de atuação, como solução, tem-se o polímero reforçados com fibra, FRP (*fiber reinforced polymer*)

para reforço das estruturas. Portanto, a reabilitação se refere às definições de reparo e reforço, com a finalidade de retornar características originais de carga do elemento.

Os FRPs são constituídos de uma matriz e uma fibra. Tipos de fibras: vidro (*Glass Fibre Reinforced Polymer – GFRP*), carbono (*carbon fiber reinforced polymer*), basalto (*Basalt Fibre Reinforced Polymer – GFRP*), e aramida (*Aramide Fibre Reinforced Polymer – AFRP*). Dentre eles, o CFRP destaca-se (Barris, et al., 2020), devido ser um material de alta relação resistência-peso, resistente à corrosão e de fácil aplicação, sendo vantajosa e dominante para restaurar estruturas de CA para condições normais (Kadhim, et al., 2019), (Hawileh et al., 2019), além da recuperação desempenho mecânico de vigas de CA após aquecidas e depois reforçadas, como na melhora 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 em forma de laminados, barras/cabos ou folhas/mantas.

Por meio da revisão sistemática da seção 2, observa-se um crescimento exponencial acerca da temática apresentada (Figura 3), evidenciando ser um assunto atual e relevante. Dentre os trabalhos encontrados na análise bibliométrica, tem-se estudos da determinação da resistência das vigas de CA por meio de análises experimentais, formulações e estudo numérico (Costa et al., 2021), (Costa et al., 2022) e (Jadooe et al. 2018a).

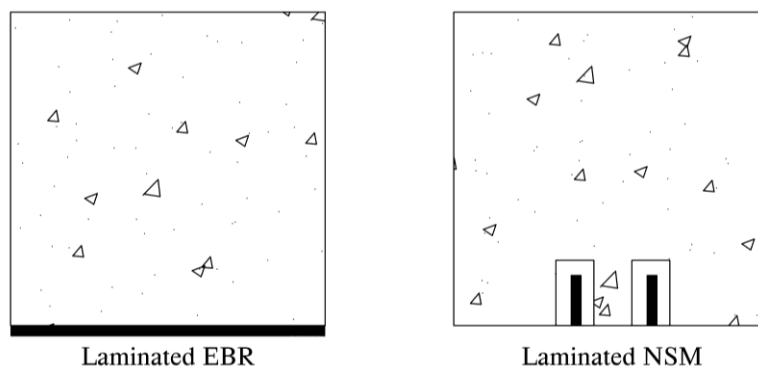
Figura 3 – Distribuição dos artigos por ano.



Fonte: A autora (2024)

Na colagem do CFRP na superfície do concreto geralmente utilizam-se duas técnicas, *Externally Bonded Reinforcement* – EBR, onde o reforço é ligado externamente e pela técnica *Near-Surface Mounted* – NSM, que realiza a ranhura do concreto a fim de inserir laminados de FRP dentro da cobertura de concreto. Ver Figura 4.

Figura 4 – Técnica de reparo.



Fonte: A autora (2024)

O desempenho da capacidade de carga e rigidez de vigas de CA reforçadas com FRP está relacionado com a aderência dos materiais contidos no reparo com FRP, ou seja, a adesão entre o FRP, o adesivo e concreto. A adesão entre materiais é influenciada a depender do carregamento e condições ambientais (Emara et al., 2018), escolha do tipo de adesivo, epóxi, à base de cimento polimérico, e cimentício não polimérico autoadensável de alta resistência (Mohammed et al., 2017), profundidade do sulco para incorporação de laminados de NSM CFRP horizontalmente (Lv et al., 2023), resistência do concreto (Dong-Er et al., 2019), (Wang e Cheng, 2021), tipo de técnica de aplicação NSM/EBR do adesivo (Siddika et al., 2020), laminados de NSM CFRP com dimensões e tipos, diferentes (Khshain et al., 2015), espaçamento entre laminados (Rashid et al., 2008), distância entre laminados e o cobrimento do concreto (Zhang et al., 2018), adição de armadura de aço no concreto (Haddad e Al-Rabadi, 2021).

Dessa forma, este estudo de revisão sistemática tem como objetivo destacar os parâmetros utilizados para estudar o desempenho da capacidade de carga de vigas de concreto armado pós-incêndio, resfriadas e então reforçadas com laminados de CFRP, a fim de pontuar suas principais descobertas.

1.2 OBJETIVOS

O trabalho visa fornecer um estudo de revisão sistemática sobre o comportamento de vigas de concreto armado após incêndio, posteriormente reforçadas com laminados de CFRP. Os objetivos específicos são:

- Identificar os principais parâmetros que influenciam o desempenho das vigas de concreto armado após incêndio e depois reforçadas com CFRP, para sua reabilitação;
- Levantar os principais métodos de ensaios, e variáveis a serem consideradas em teste de resistência de vigas de concreto armado após incêndio e reforçadas com CFRP;
- Pontuar as principais formulações analíticas utilizadas para prever o comportamento das vigas de concreto armado após incêndio e para quantificar o reforço em CFRP;
- Analisar os modos de falha ocasionados de vigas reforçadas danificadas pelo incêndio e posteriormente reforçadas com laminados de CFRP.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

O texto é organizado em quatro capítulos. O capítulo 1, reservou-se a introduzir o trabalho por meio da justificativa, objetivos, e estrutura do texto.

No capítulo 2 consta o método da revisão sistemática da literatura (RSL).

No capítulo 3 apresenta o estado da arte a partir dos artigos elegíveis da (RSL) com os principais resultados.

No capítulo 4 aponta as discussões sobre os resultados apresentados no capítulo 3.

O capítulo 5 aborda as conclusões finais e propõe sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO SISTEMÁTICA

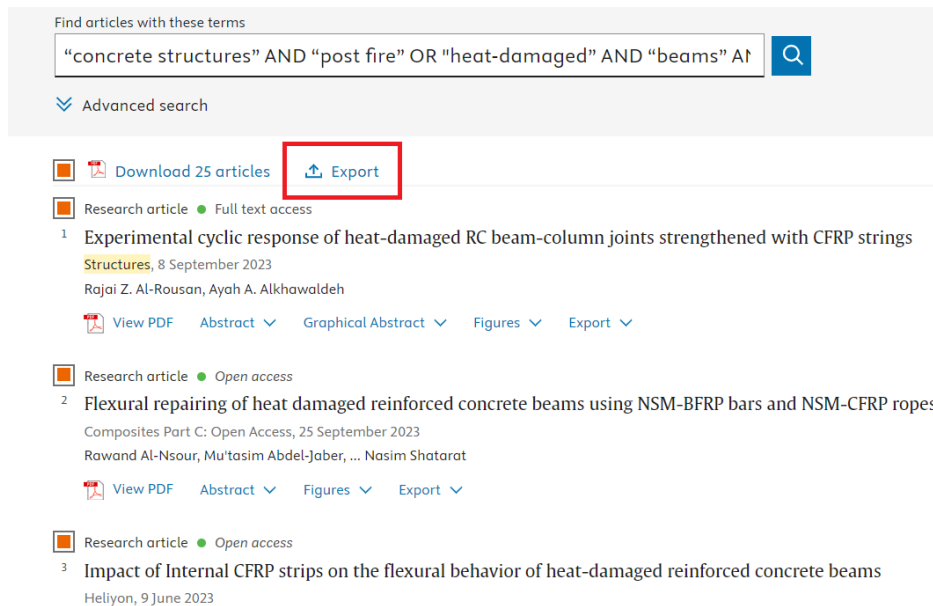
Foi realizado uma análise bibliométrica com buscas nos portais de periódicos *Engineering Village*, Portal CAPES, *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*, visando encontrar artigos de alto impacto, sobre vigas de concreto reforçadas com laminados de CFRP, após incêndio. Dessa maneira, para as buscas, em cada portal utilizou-se de palavras-chaves: *concrete structures AND post fire OR heat-damaged AND beams AND CFRP*, tem-se as seguintes *strings* de buscas:

- *Engineering Village*: {concrete structures} AND {post fire} OR {heat-damaged} AND {beams} AND {CFRP}.
- Portal CAPES: “concrete structures” AND “post fire” OR “heat-damaged” AND “beams” AND “CFRP”.
- *Science Direct*: “concrete structures” AND “post fire” OR “heat-damaged” AND “beams” AND “CFRP”.
- *Web of Science*: (concrete structures) AND (post fire) OR (heat-damaged) AND (beams) AND (CFRP).
- *Scopus*: TITLE-ABS-KEY ("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-chaves 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-chaves do artigo. A seleção foi realizada com objetivo de abranger artigos a partir do ano de 1990 até setembro de 2023 (Figura 3).

Os artigos localizados das buscas de bases de periódicos, foram exportados para um arquivo com extensão “.RIS”, disponível em cada plataforma (Figura 5).

Figura 5 – Exportação extensão RIS.



Fonte: Captura de tela de trabalho do *Science Direct*

Por meio da ferramenta *Rayyan* foi criando o projeto com nome “VIGAS DE RC REFORÇADAS COM CFRP APÓS INCÊNDIO” (Figura 6). Nessa ferramenta todos artigos encontrados nas diferentes bases de periódicos, foram carregados no *Rayyan*. Na ferramenta, é possível visualizar os respectivos títulos, resumos, autores, ano de publicação, dos artigos.

Figura 6 – Criação de projeto.

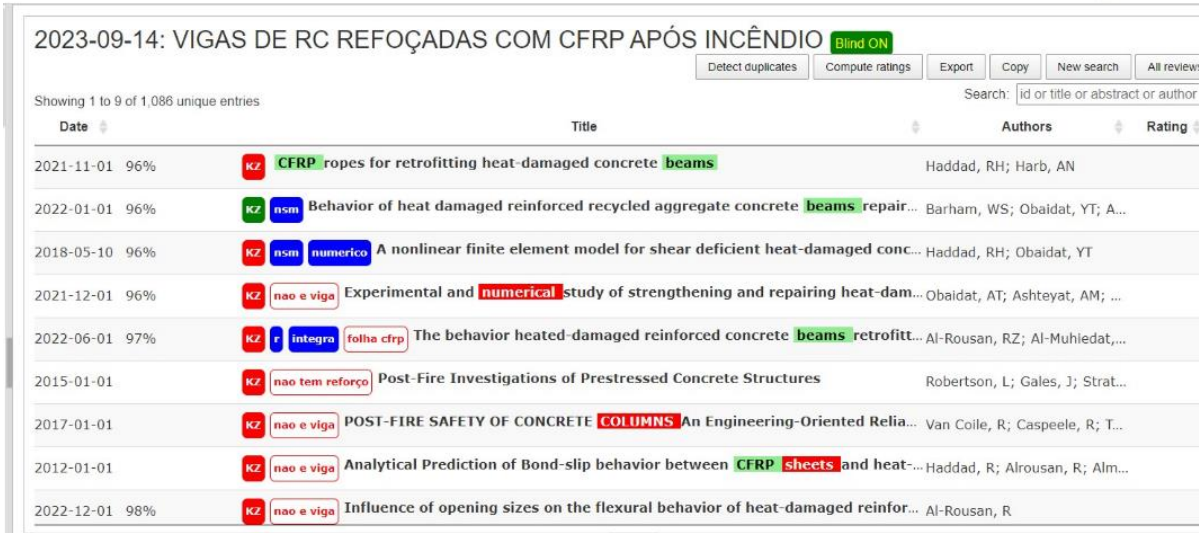
The screenshot shows the Rayyan project creation form. At the top, there are four tabs: "My Reviews (0)", "Collaboration Reviews (0)", "Translation Only Reviews (0)", and "Other Reviews (5)". Below the tabs, there is a section for "New review...". The form contains the following fields:

- Title ***: VIGAS DE RC REFORÇADAS COM CFRP APÓS INCÊNDIO
- Research field ***: Not applicable
- Review type ***: Not applicable
- Review domain ***: Not applicable
- Description**: (Empty text area)

At the bottom left, there is a green "Create" button.

Fonte: Captura de tela de trabalho do *Rayyan*

Figura 8 – Tela de trabalho Rayyan.



Fonte: Captura de tela de trabalho do Rayyan

Com intuito da construção de uma revisão sistemática da literatura (RSL), os artigos encontrados nas bases de dados de periódicos, foram aplicados critérios de elegibilidade, seleção e exclusão, a fim de selecionar os artigos elegíveis. Os artigos elegíveis têm-se aqueles que compreendiam sobre a temática de vigas de concreto armado danificadas a elevadas temperaturas e depois reforçadas com laminados de CFRP. A seleção e classificação dos artigos seguem a Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do Protocolo definidos para a pesquisa

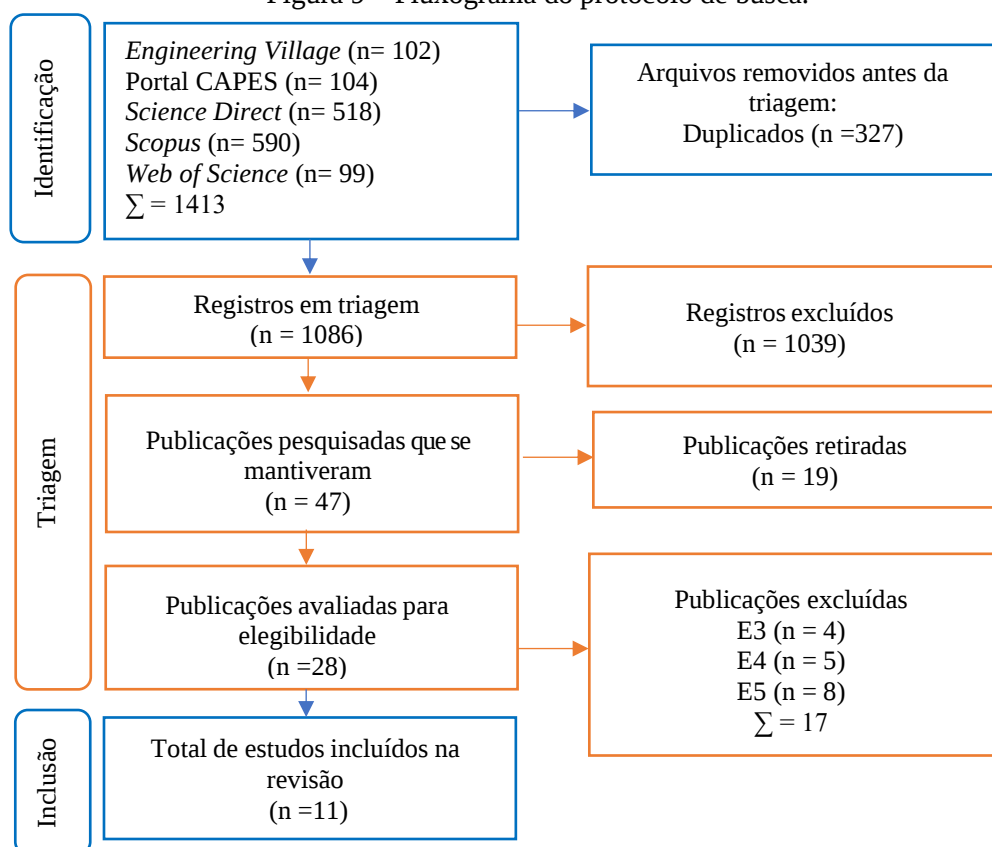
Parâmetros	
Questão principal	Qual comportamento das vigas de concreto armado após incêndio reforçado com laminado de CFRP? Quais os critérios avaliados?
String de buscas	“Concrete structures” AND “post fire” OR “heat-damaged” AND “beams” AND “CFRP”
Base de periódicos	Engineering Village, Portal Capes, Science Direct, Scopus e Web of Science
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

Fonte: A autora (2024)

Ao analisar a escrita dos artigos, foram excluídos os estudos que não referiam que o estudo era experimental de vigas e danificadas e reforçadas, ainda no título do artigo. A triagem dos artigos foi seguida de três etapas, consoante a metodologia PRISMA, detalhada na Figura 9 (PAGE et al., 2021).

Levando em consideração os Critérios de Exclusão e Inclusão da Tabela 1, foram aplicados primeiro na leitura dos títulos dos artigos, com isso retirando os trabalhos ilegíveis. Em seguida com os artigos que se mantiveram, foram aplicados novamente os parâmetros de seleção analisando os resumos dos estudos, da mesma maneira, excluindo-se aqueles que não se enquadravam nos parâmetros de seleção, logo em sequência, ao restante dos artigos, foi realizado a leitura na íntegra com objetivo de incluir os artigos que seriam inseridos nesta revisão, aplicando os parâmetros de inclusão e exclusão. Estes artigos são tratados na última etapa, inclusão/artigos elegíveis, sendo incluídos o total de 11 artigos.

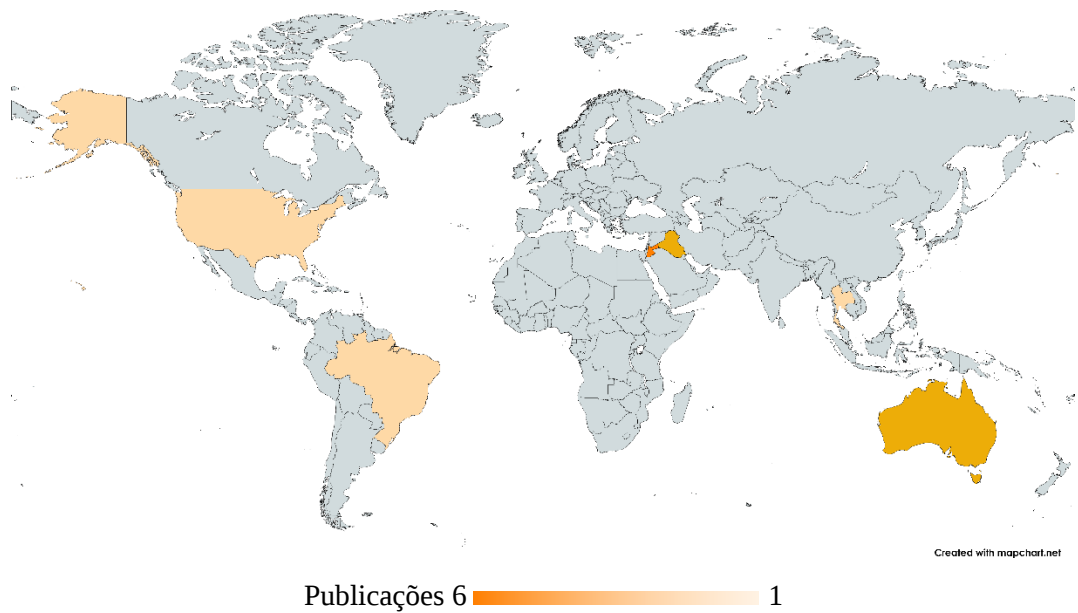
Figura 9 – Fluxograma do protocolo de busca.



Fonte: A autora (2024)

Os trabalhos elegíveis foram encontrados escritos por autores de diferentes países: Jordânia, Estados Unidos, Austrália, Iraque, Brasil e Tailândia (Figura 10).

Figura 10 – Distribuição dos artigos por países



Fonte: Gerado no mapchart.net (2024)

Os artigos elegíveis, localizados por meio da RSL são listados na Tabela 2. Os trabalhos são ordenados segundo sua relevância, ou seja, por meio do número de citações

Tabela 2 – Trabalhos elegíveis

Autor	n° citações	Título
Jadooe et al. (2017a)	39	<i>Experimental and numerical study of strengthening of heat-damaged RC beams using NSM CFRP strips</i>
Haddad e Almomani (2017)	35	<i>Recovering flexural performance of thermally damaged concrete beams using NSM CFRP strips</i>
Haddad e Almasaeid (2016)	22	<i>Recovering shear capacity of heat-damaged beams using NSM-CFRP strips</i>
Jadooe et al. (2018a)	18	<i>Performance of heat-damaged partially-insulated RC beams strengthened with NSM CFRP strips and epoxy adhesive. Construction and Building Materials</i>
Ashteyat et al. (2020)	13	<i>Repair of heat-damaged SCC cantilever beams using SNSM CFRP strips</i>
Jadooe et al. (2018b)	12	<i>Behaviour of heat-damaged partially-insulated RC beams using NSM systems</i>
Lenwari et al. (2020)	9	<i>Cyclic Flexural Performance of Fire-Damaged Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates</i>
Haddad e Yaghmour (2020)	7	<i>Retrofitting Heat-Damaged concrete beams using different profiles of side NSM CFRP strips</i>

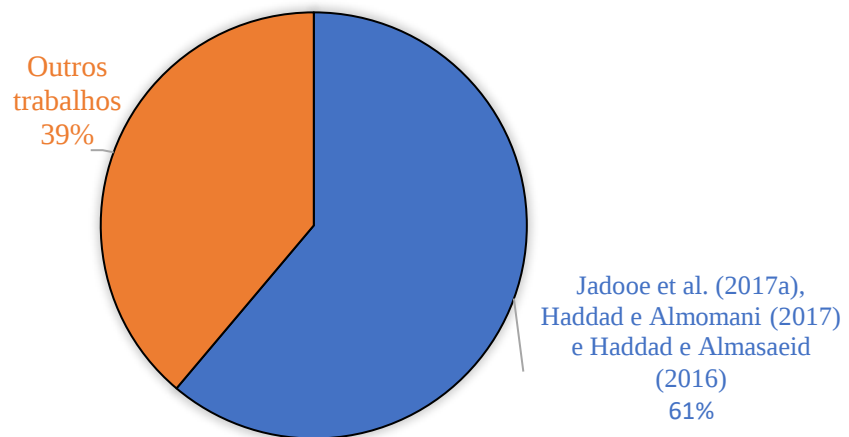
Tabela 2 – Trabalhos elegíveis

Autor	n° citações	Título
Barham et al. (2022)	2	<i>Behavior of heat damaged reinforced recycled aggregate concrete beams repaired with NSM-CFRP strips</i>
Costa et al. (2023)	0	<i>Shear strengthening of fire-damaged reinforced concrete beams using NSM CFRP laminates</i>
Obaidat et al. (2023)	0	<i>Repair of thermally shocked reinforced concrete beams using near-surface mounted – Carbon fiber reinforced polymers ropes and strips</i>

Fonte: A autora (2024)

Os trabalhos de maiores números de citações foram encontrados no trabalho de Jadooe et al. (2017a), Haddad e Almomani (2017) e Haddad e Almasaeid (2016), concentrando o somatório de mais 61% das citações (Figura 11).

Figura 11 – Distribuição das citações dos trabalhos elegíveis



Fonte: A autora (2024)

3 ESTADO DA ARTE

3.1 RESUMO DOS ARTIGOS ELEGÍVEIS

Nesse capítulo, apresenta-se um breve resumo dos trabalhos elegíveis (Tabela 2) e principais conclusões. Com isso, são destacados por meio de gráficos o percentual da capacidade de carga residual (Equação 1) e da capacidade residual de rigidez (Equação 2) de vigas de concreto armado danificadas a elevadas temperaturas, resfriadas e depois reforçadas com laminados de CFRP, dadas segundo as equações:

$$\frac{P_i}{P_{amb}} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

P_i = carga de ruptura da viga aquecida, resfriada e depois reforçada com laminado de CFRP, P_{amb} = carga de ruptura da viga em temperatura ambiente.

$$\frac{R_i}{R_{amb}} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

R_i = rigidez da viga aquecida, resfriada e depois reforçada com laminado de CFRP, R_{amb} = rigidez da viga em temperatura ambiente.

Desse modo, a capacidade de carga e da capacidade de rigidez da viga ambiente é 100%. Ademais, as vigas de concreto armado, aquecidas, resfriadas e depois reforçadas com laminados de CFRP com $\frac{P_i}{P_{amb}} \geq 100\%$ e $\frac{R_i}{R_{amb}} \geq 100\%$, conseguem restabelecer a capacidade de carga e rigidez, respectivamente. Mas quando $\frac{P_i}{P_{amb}} < 100\%$ e $\frac{R_i}{R_{amb}} < 100\%$, não conseguem recuperar.

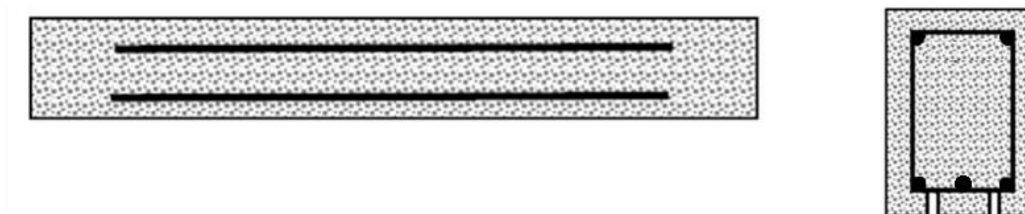
Para evitar confusões, a nomenclatura das amostras em todos os trabalhos elegíveis seguiu a definida pelos autores. Além disso, são identificadas somente as amostras utilizadas para analisar vigas aquecidas e depois reforçadas com laminados de CFRP.

3.1.1 Jadooe et al. (2017a)

Realizaram um programa experimental de oito vigas de concreto armado superdimensionadas ao cisalhamento, aquecidas sob curva de incêndio padrão ISO 834. As vigas (140 mm × 260 mm × 2700 mm) após aquecimento (600 e 700 °C), mantidas por duas horas, e resfriadas foram reforçadas à flexão com laminados de CFRP (Figura 12), com largura

de 20 mm e altura adequada para a ranhura de 25 mm de profundidade, utilizando a técnica NSM, com uso de adesivo a base de cimento e adesivo epóxi. Ademais, todas as vigas foram ensaiadas à flexão em configuração de carregamento de quatro pontos. As distribuições das vigas de Jadooe et al. (2017) podem ser visualizadas na Tabela 3.

Figura 12 – Modelo de reforço da vista superior e seção da viga.



Fonte: Adaptado Haddad e Almomani (2017)

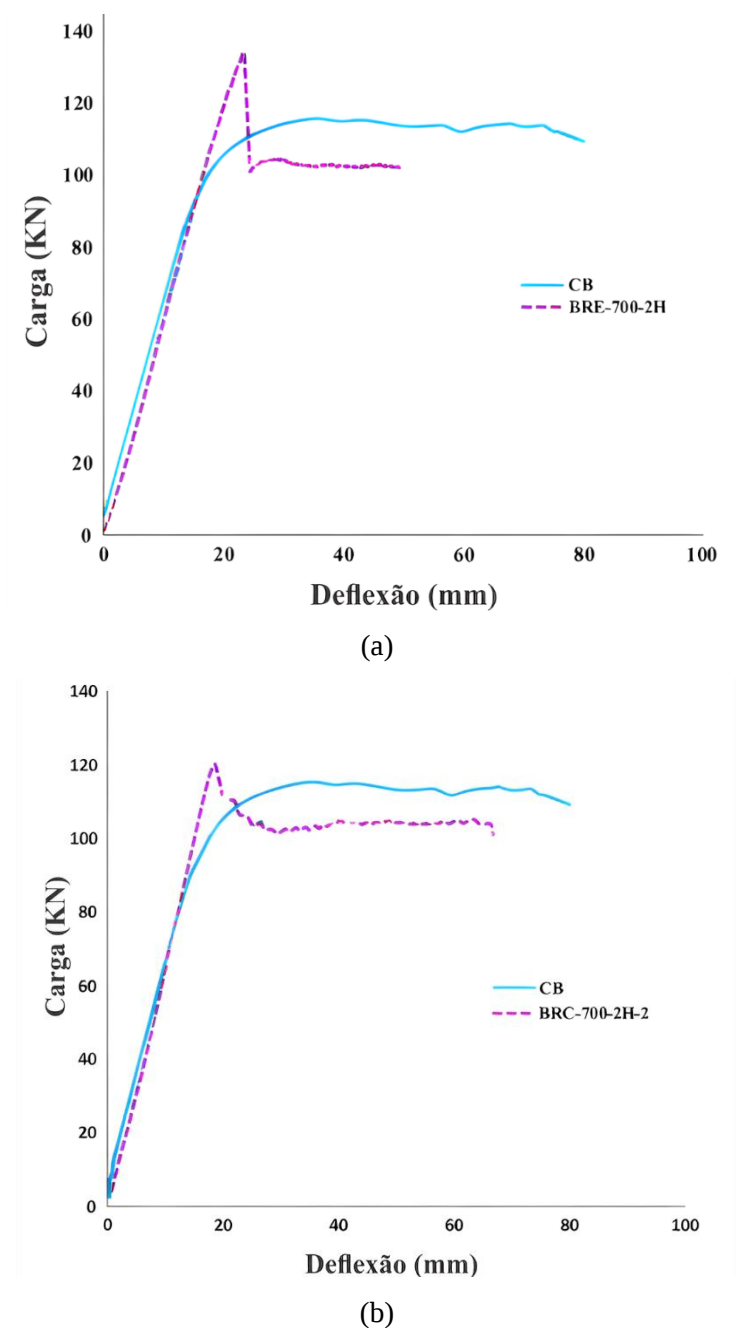
Tabela 3 – Identificação de amostras do trabalho de Jadooe et al. (2017)

ID	Temperatura (°C)	Reforço NSM CFRP	Tipo de Adesivo
B-25C-1	25	Não	-
B-25C-2	25	Não	-
B-600-2H C	600	Não	-
B-700-2H C	700	Não	-
BRE-700-2H C - 1	700	Sim	Epóxi
BRE-700-2H C - 2	700	Sim	Epóxi
BRC-700-2H C - 1	700	Sim	Cimentício
BRC-700-2H C - 2	700	Sim	Cimentício

Fonte: Adptado Jadooe et al. (2017).

A maior carga final das vigas aquecidas e reparadas a flexão com laminado de CFRP, com adesivo epóxi foram recuperadas até 118%, com carga final de 135,5 kN (BRE-700-2H-1) e 105%, com carga de ruptura de 120,5 kN, utilizando adesivo a base de cimento (BRC-700-2H-1). Além disso, a rigidez inicial também foi recuperada (Figura 13) e quando reparadas com laminado NSM CFRP com adesivo epóxi, apresentou melhor capacidade de carga e capacidade de rigidez, comparada com reparadas com adesivo a base de cimento.

Figura 13 – Curvas carga-deflexão experimentais a) com adesivo epóxi b) com adesivo à base de cimento

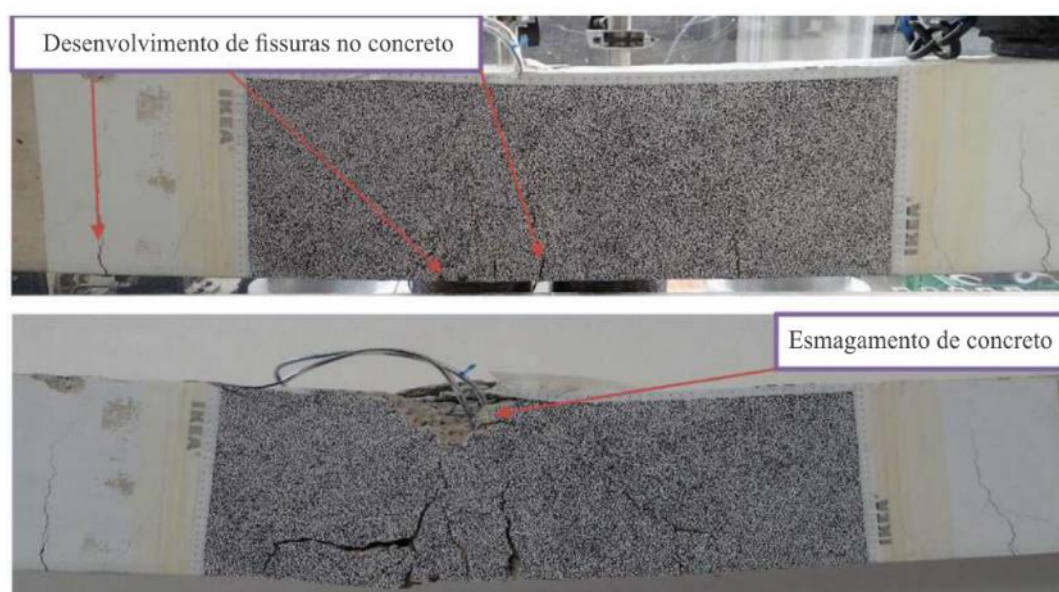


Fonte: Adaptado Jadooe et al. (2017a)

Todas as vigas apresentaram ruptura por flexão (Figura 14a), como esperado. As vigas de referência ambiente e as vigas de referência aquecidas apresentaram modo de falha por escoamento do aço e posterior ruptura por compressão (Figura 14b). Para as vigas aquecidas, resfriadas e seguidas do reparo com as fibras de carbono com a técnica NSM, com adesivo a base de cimento e adesivo epóxi, apresentam modo de falha semelhantes. À medida que a carga

se elevava e se aproximava da capacidade máxima, evidenciou a PO, *peeling-off* (separação do cobrimento do concreto), escoamento do aço e depois a ruptura por compressão, com adesivo epóxi e com adesivo cimentício separação de parte do cobrimento do concreto na região dos laminados de CFRP e depois a ruptura compressiva do concreto (Figura 14c).

Figura 14 – Modos de falha de algumas vigas CA a) Para a viga ambiente b) Para a viga aquecida a 700 C, c) viga reforçada com CFRP



(a)



(b)

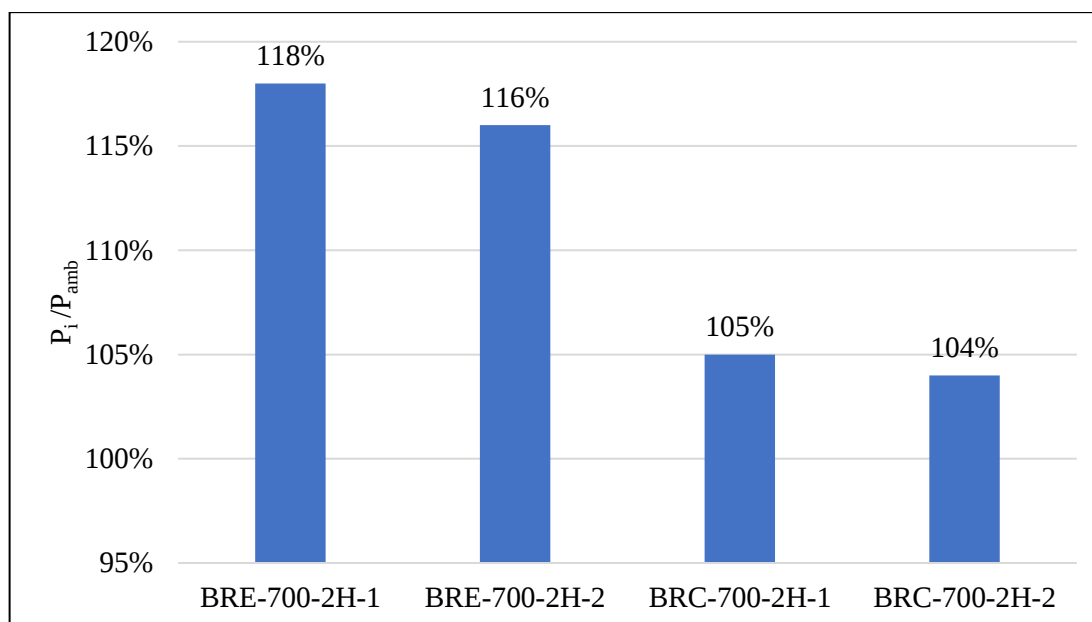


(c)

Fonte: Adaptado Jadooe et al. (2017a)

Portanto, é possível concluir, através da Figura 15, que todas as vigas recuperaram a capacidade de carga inicial, independentemente do tipo de adesivo utilizado para reparo.

Figura 15 – Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Jadooe et al. (2017)

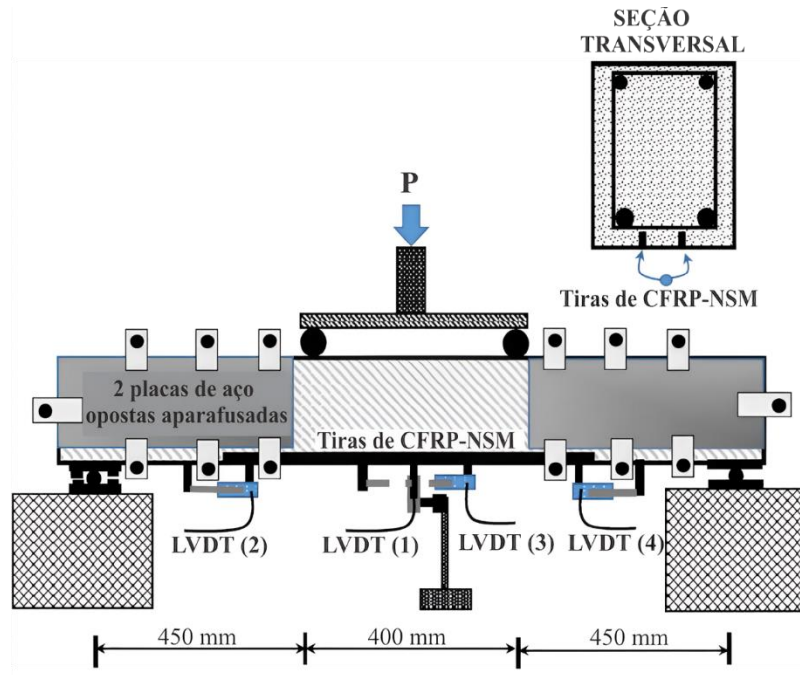


Fonte: A autora (2024)

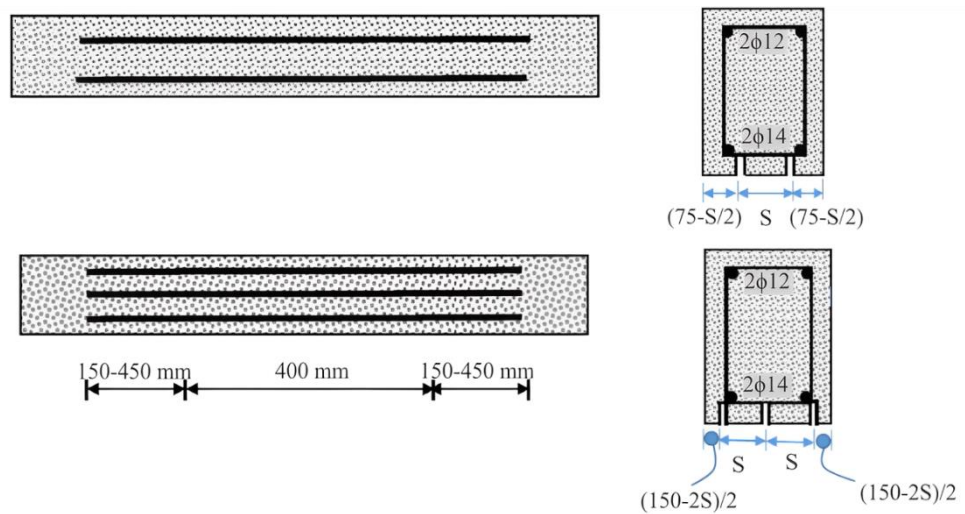
3.1.2 Haddad e Almomani (2017)

Trata de estudo experimental da recuperação do desempenho a flexão de vigas de concreto danificadas termicamente e posteriormente reforçadas a flexão com laminados de CFRP (15×25 mm), através da técnica NSM e o uso do adesivo epóxi. O total de 20 vigas de CA ($150 \times 250 \times 1400$ mm) foram fabricadas. As vigas foram mantidas aquecidas à temperatura de 600°C e os parâmetros do reforço visam: número de laminados NSM CFRP, sua extensão e espaçamento. O modelo de reforço segue segundo a Figura 16.

Figura 16 – Modelo do reforço nas vigas a) vista frontal b) vista superior e seção da viga



(a)



(b)

Fonte: Adaptado Haddad e Almomani (2017)

Dentre as vigas estudadas tem-se, viga ambiente e vigas reforçadas após aquecimento, que segue a nomenclatura da Tabela 4. O desempenho mecânico foi testado em todas as vigas por meio da configuração de teste de carga de quatro pontos. O regime de aquecimento adotado foi lento e não segue nenhuma curva de incêndio padrão.

Tabela 4 –Identificação de amostras do trabalho de Haddad e Almomani (2017)

ID	Temperatura (°C)	Reforço NSM CFRP	Comprimento de embutimento (mm)	Número de tiras
C	25	Não	-	-
HD_SN ₂ _EL(15)_SP _{7.5}	600	Sim	150	2
HD_SN ₂ _EL(25)_SP _{7.5}	600	Sim	250	2
HD_SN ₂ _EL(45)_SP _{7.5}	600	Sim	450	2
HD_SN ₃ _EL(15)_SP _{7.5}	600	Sim	150	3

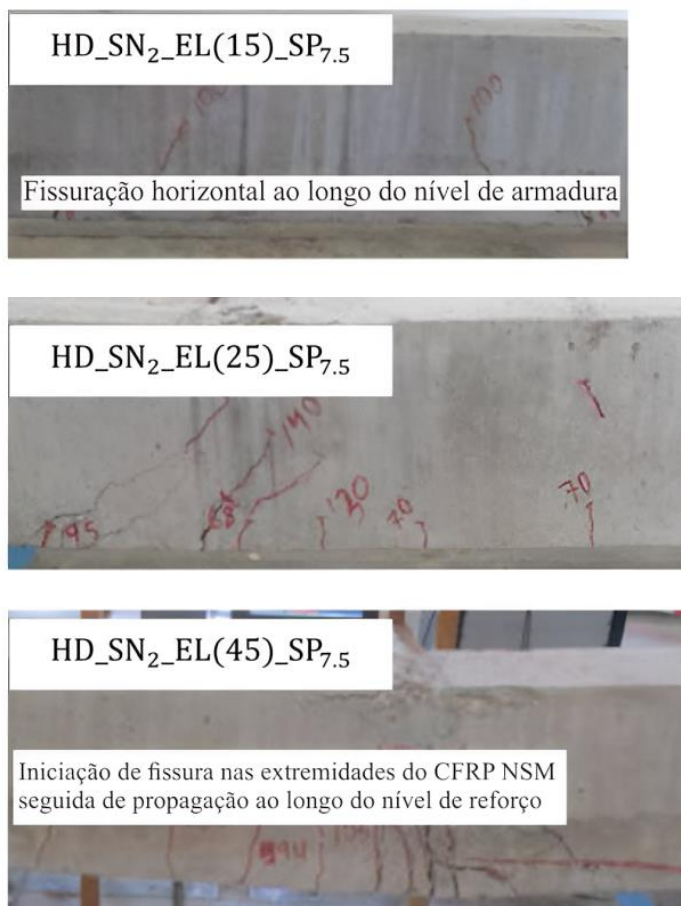
Fonte: Adaptado Haddad e Almomani (2017)

Também realizou-se, reforço adicional ao cisalhamento, a fim de garantir a falha da peça por flexão, utilizado duas placas de aço paralelas de 10 mm de espessura localizadas em ambas regiões de alto cisalhamento, cobrindo o zonas de cisalhamento com distância de 30 mm da superfície inferior do intradorso das vigas onde são inseridas as laminados de NSM CFRP, sendo assim as chapas de aço não influenciam na avaliação sobre a possível separação final do cobrimento do concreto das vigas reforçadas/reparadas.

As vigas danificadas pelo calor de 600°C e depois reforçadas com dois laminados de NSM CFRP, variam a capacidade de carga máxima a depender do comprimento incorporado. Sendo assim, apresentou carga última da peça com 113 kN, 68% (HD_SN₂_EL(15)_SP_{7.5}), 137 kN, 83% (HD_SN₂_EL(25)_SP_{7.5}), e 165 kN, 100% (HD_SN₂_EL(45)_SP_{7.5}). Quando reforçada com três laminados de NSM CFRP, registrou menor capacidade de carga última de 92 kN, 56% (HD_SN₃_EL(15)_SP_{7.5}).

O modo de ruptura de todas as vigas ensaiadas ocorreu por flexão. A falha para vigas danificadas pelo calor e depois reparadas à flexão com laminados de NSM CFRP para os diferentes comprimentos de embutimento (150, 250 e 450 mm), foram semelhantes. As fissuras iniciais de flexão ocorreram na zona intermediária e depois se estenderam ao longo do vão da peça até a separação do recobrimento de concreto e dos laminados de NSM CFRP (Figura 17).

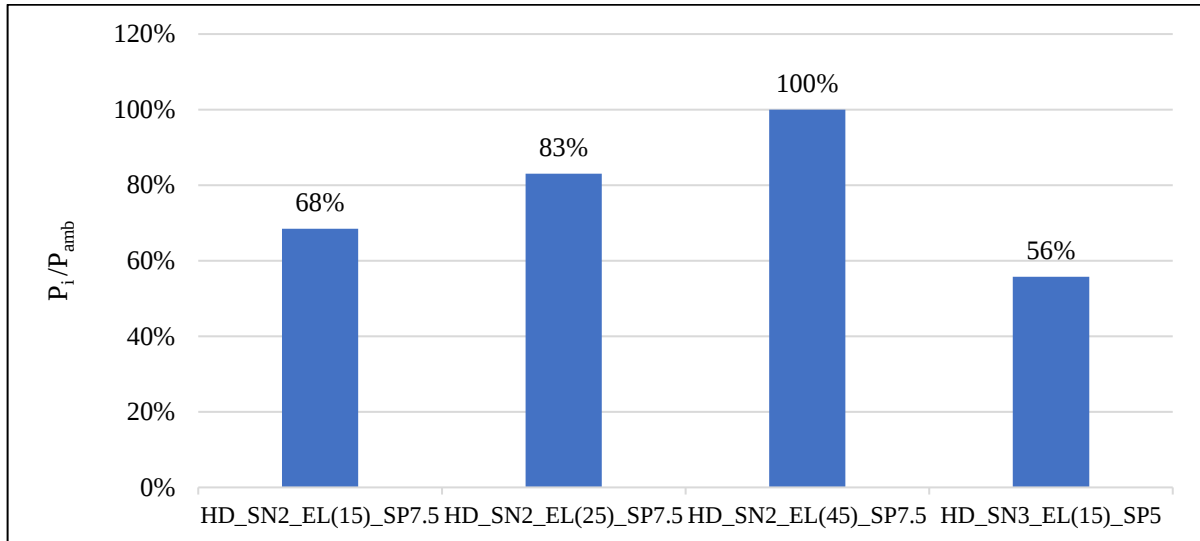
Figura 17 – Modelo aderência-deslizamento encontrado experimentalmente



Fonte: Adaptado Haddad e Almomani (2017)

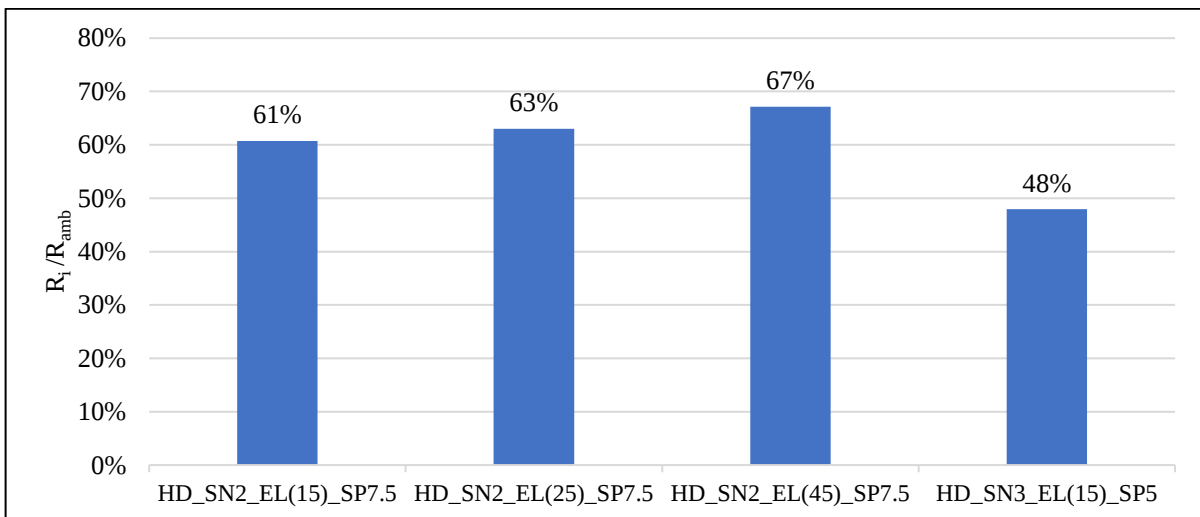
Através da Figura 18 e 19 é possível observar que com o aumento do comprimento do embutimento das vigas reforçadas com dois laminados de CFRP, ocorre o aumento do percentual de carga e rigidez. No entanto, somente a viga com reforço de comprimento de 450 mm atingiu recuperação da capacidade de carga, mas nenhuma viga recuperou a rigidez.

Figura 18 – Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Haddad e Almomani (2017)



Fonte: A autora (2024)

Figura 19 – Percentual da capacidade de rigidez residual das vigas ensaiadas de Haddad e Almomani (2017)



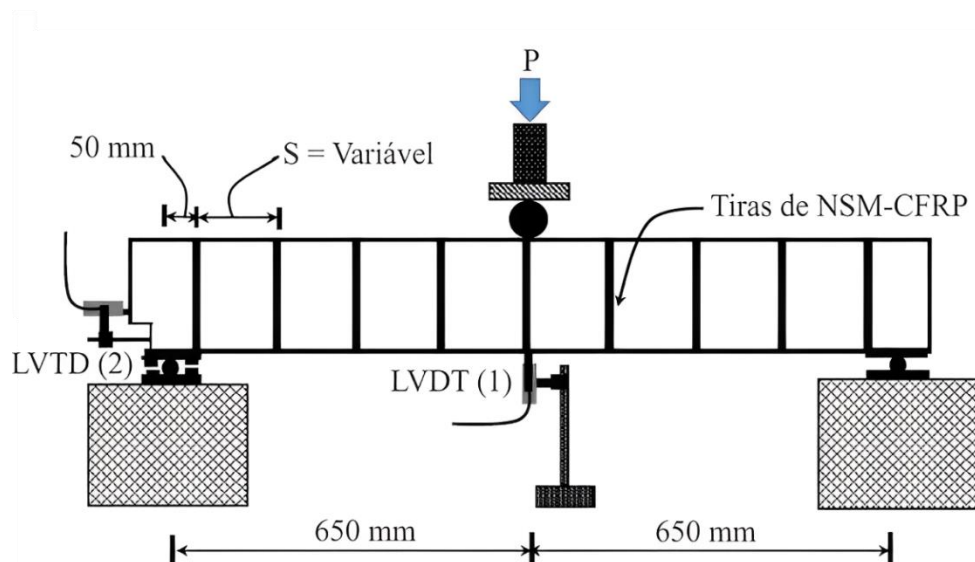
Fonte: A autora (2024)

3.1.3 Haddad e Almasaeid (2016)

Confeccionaram um total de 20 vigas ($150 \times 250 \times 1400$ mm), e estudaram o comportamento de vigas submetidas ao dano ao calor por diferentes temperaturas (300, 500 e 600 °C), mantidas por duas horas, resfriadas lentamente e posteriormente reforçadas ao

cisalhamento com NSM laminados CFRP ($15 \times 2,5$ mm), coladas com adesivo epóxi, com diferentes espaçamentos (100, 150 e 200 mm), ver Figura 20.

Figura 20 – Esquema da distribuição dos laminados de NSM-CFRP ao longo do vão da viga



Fonte: Adaptado Haddad e Almasaeid (2016)

A distribuição com a identificação das principais vigas analisadas pode ser observada na Tabela 5. Todos os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de carga de três pontos. A taxa de aquecimento das vigas danificadas apresentou um aquecimento muito lento e não rege nenhuma curva de incêndio padrão.

Tabela 5 – Identificação de amostras do trabalho de Haddad e Almasaeid (2016)

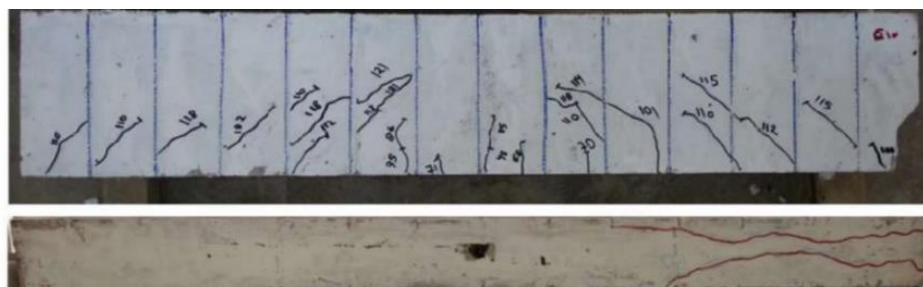
ID	Temperatura (°C)	Reforço NSM CFRP	Espaçamento (mm)
C	23	Não	-
HD300-RS20	300	Sim	200
HD500-RS10	500	Sim	100
HD500-RS20	500	Sim	200
HD600-RS10	600	Sim	100
HD600-RS15	600	Sim	150
HD600-RS20	600	Sim	200

Fonte: Haddad e Almasaeid (2016)

A eficiência do reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado aquecidas e posterior uso de laminados NSM CFRP, é influenciada pelo tempo de exposição, temperatura máxima da temperatura e o espaçamento entre os laminados NSM CFRP. Dessa maneira, os resultados apontam que a maior capacidade de carga residual e rigidez foi para viga HD300-RS20 com até 136 kN (149%) e 36 MN/m (90%), respectivamente. E para a o espécime HD500-RS10 com carga final de 119 kN (130%) e rigidez de 20 MN/m (49%).

As vigas de CA reforçadas ao cisalhamento com laminados NSM-CFRP, após aquecidas, falharam ao cisalhamento, como esperado. A ruptura das amostras aquecidas a 500 e 600 °C e posteriormente reforçadas com laminados de CFRP, ocorreu pela combinação da falha ao cisalhamento e a falha do descolamento do cobrimento do concreto (Figura 21).

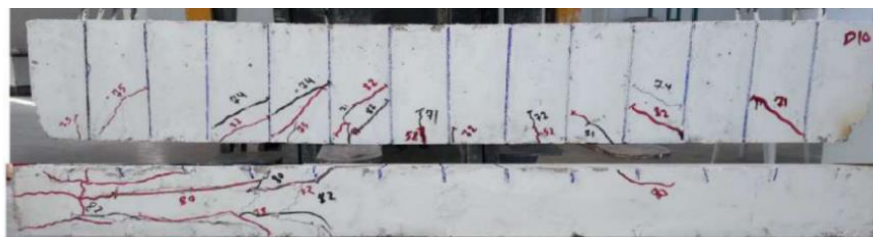
Figura 21 – Fissuração e modo de falha para vigas danificadas a 500 e 600 °C e reparadas com laminados de CFRP



(a) Viga HD₅₀₀-RS₁₀ (Vistas de elevação e fundo)

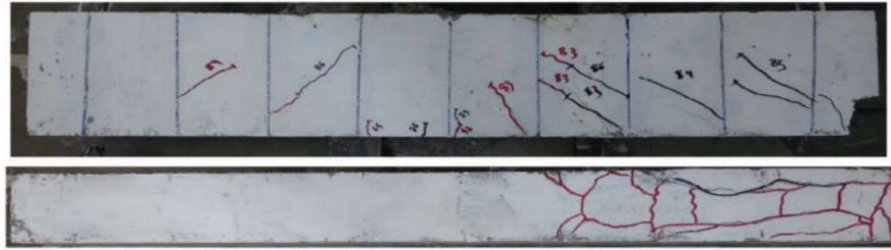


(b) Viga HD₅₀₀-RS₂₀ (Vistas de elevação e fundo)



(c) Viga HD₆₀₀-RS₁₀ (Vistas de elevação e fundo)

Figura 21 – Fissuração e modo de falha para vigas danificadas a 500 e 600 °C e reparadas com laminados de CFRP



(d) Viga HD₆₀₀-RS₁₅ (Vistas de elevação e fundo)

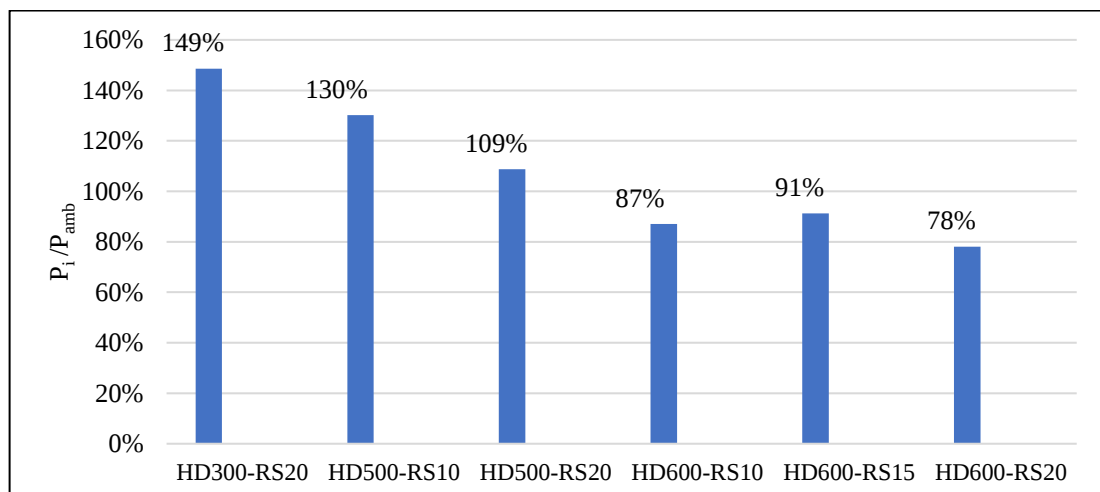


(e) Viga HD₆₀₀-RS₁₅ (Vistas de elevação e fundo)

Fonte: Adaptado Haddad e Almasaeid (2016)

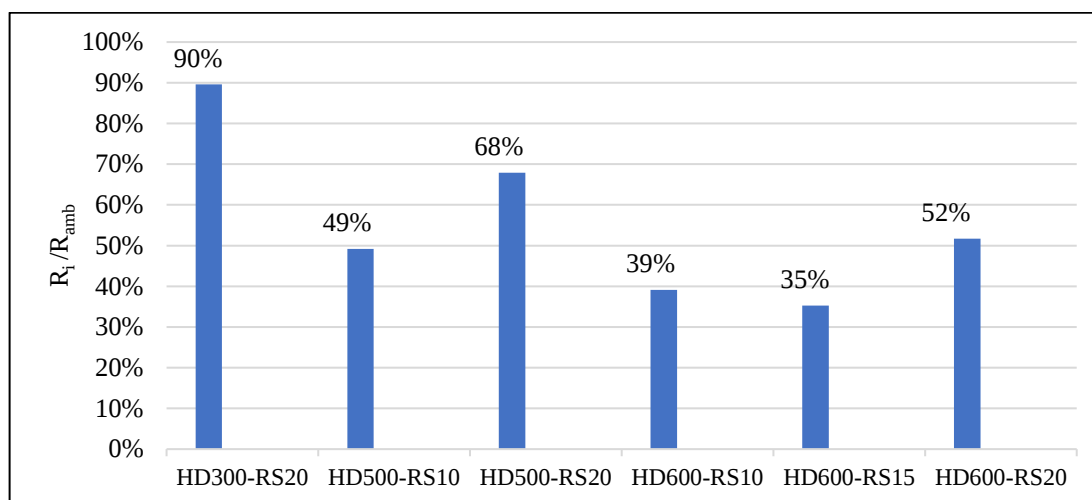
Dessa forma, tem-se que a redução do espaçamento entre os laminados elevou a capacidade de carga de cisalhamento e recuperou a capacidade de carga das vigas até o dano de 500 °C da peça de CA (Figura 22), quando evitada a ruptura por arrancamento do cobrimento de concreto. Com relação à rigidez, não houve recuperação (Figura 23).

Figura 22 – Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Haddad e Almasaeid (2016)



Fonte: A autora (2024)

Figura 23 – Percentual da capacidade de rigidez residual das vigas ensaiadas de Haddad e Almasaeid (2016)



Fonte: A autora (2024)

3.1.4 Jadooe et al. (2018a)

Trata do estudo experimental e numérico do comportamento de vigas CA danificadas ao calor e posteriormente reforçada à flexão com laminados de CFRP (Figura 13), com largura de 20 mm e altura adequada para a ranhura de 25 mm de profundidade, utilizando a técnica NSM e coladas com epóxi. Foram moldadas 12 amostras (140 mm × 260 mm × 2700 mm), dentre as vigas fabricadas, tem-se viga ambiente e vigas depois de aquecidas reforçadas com laminados de CFRP, certas com e sem isolamento na superfície superior do concreto. As vigas foram aquecidas sob a curva de incêndio padrão ISO-834, mantidas a temperaturas de 700 e 800 °C, por duas horas. A identificação das vigas é possível observar na Tabela 6. Ademais, todas as amostras foram testadas em configuração de carregamento a quatro pontos com finalidade de compreender o comportamento do reforço à flexão do laminado de NSM CFRP.

Tabela 6 – Identificação de amostras do trabalho de Jadooe et al. (2018a)

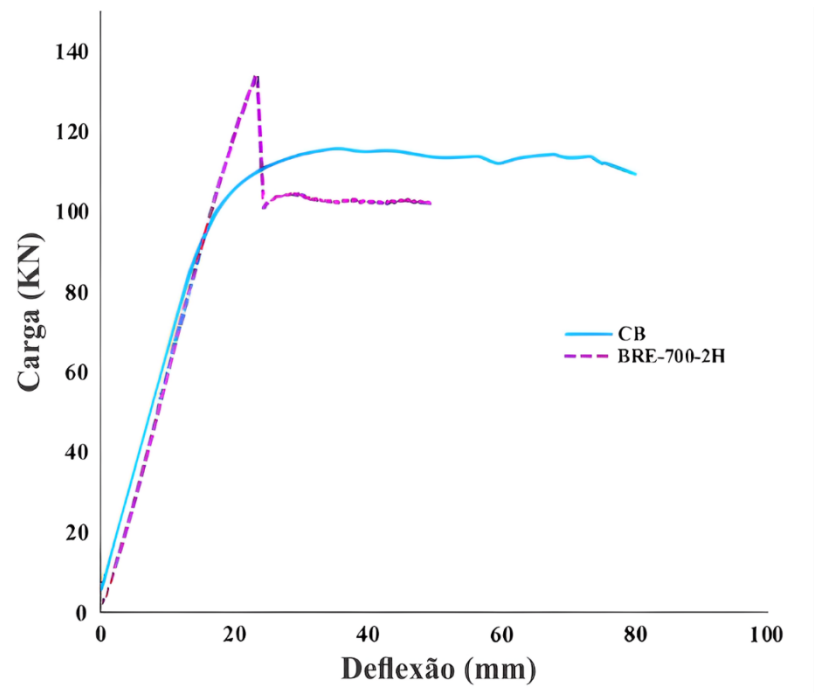
ID	Temperatura (°C)	Reforço NSM CFRP	Isolamento na superfície	Tipo de Adesivo
CB	25	Não	Não	-
BRE-700-2H-1	700	Sim	Não	Epóxi
BRE-700-2H-2	700	Sim	Não	Epóxi
BRE-PI-700-2H-1	700	Sim	Sim	Epóxi
BRE-PI-700-2H-1	700	Sim	Sim	Epóxi
BRE-PI-800-2H-1	800	Sim	Sim	Epóxi
BRE-PI-800-2H-2	800	Sim	Sim	Epóxi

Fonte: Adaptado Jadooe et al. (2018a).

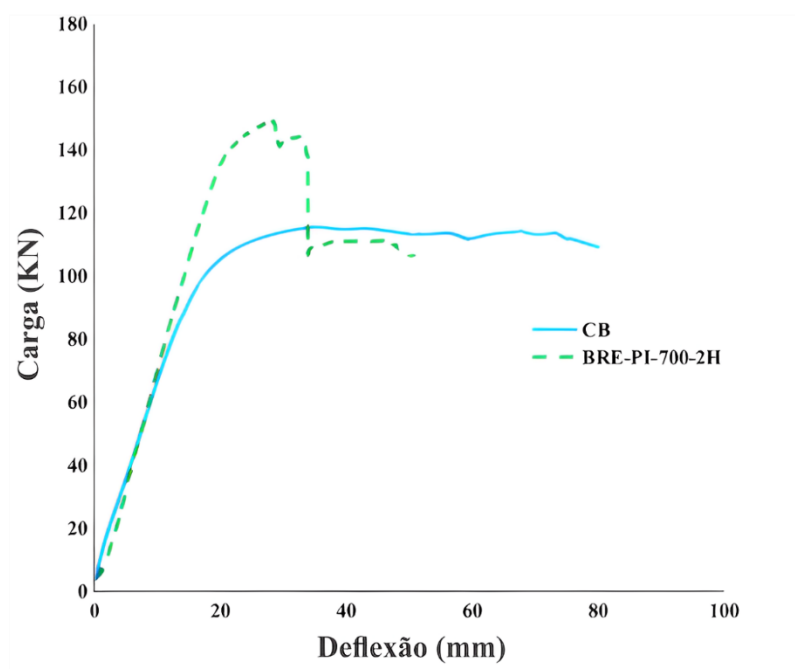
A carga última e da rigidez, foi aumentada, após as peças de CA, aquecidas e depois resfriadas, serem reforçadas com laminados de CFRP. Se tratando de vigas depois do aquecimento e então reparadas com isolamento e reforçadas com laminado de CFRP, a maior carga última ocorreu para a peça BRE-PI-700-2H-1 com até 148 kN (129%), ao dano de 700°C. E para o dano de 800 °C a capacidade de carga foi de 132 kN (127%), para o espécime BRE-PI-800-2H-1. Além disso, a rigidez inicial também foi recuperada, para ambos os casos (Figura 24).

O modo de falha para todas as amostras ocorreu por flexão. Para as vigas utilizando isolamento aquecidas e reforçadas com CFRP ocorreu por PO na região do laminado, escoamento do aço e depois a ruptura por compressão. Observar Figura 14a,14c.

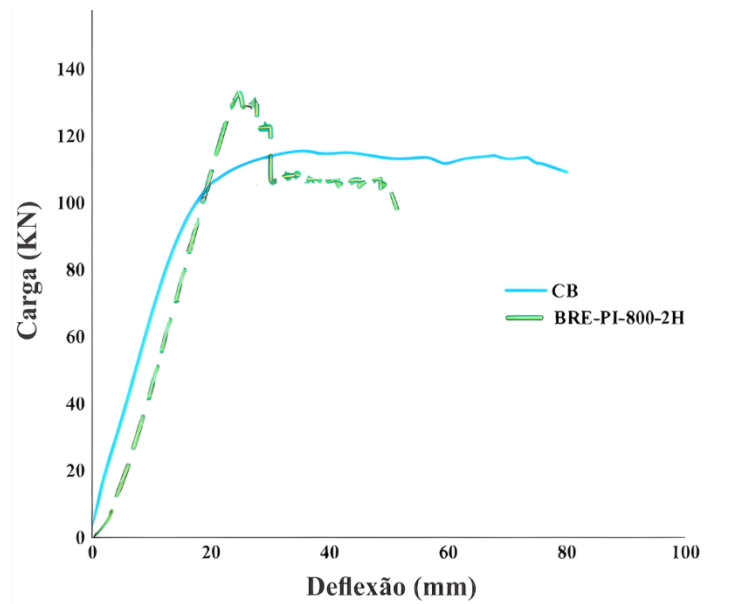
Figura 24 – Carga e deflexão no meio do vão



(a) Com adesivo epóxi após exposição a 700 C sem isolamento



(b) Usando isolamento parcial e adesivo epóxi após exposição a 700 °C

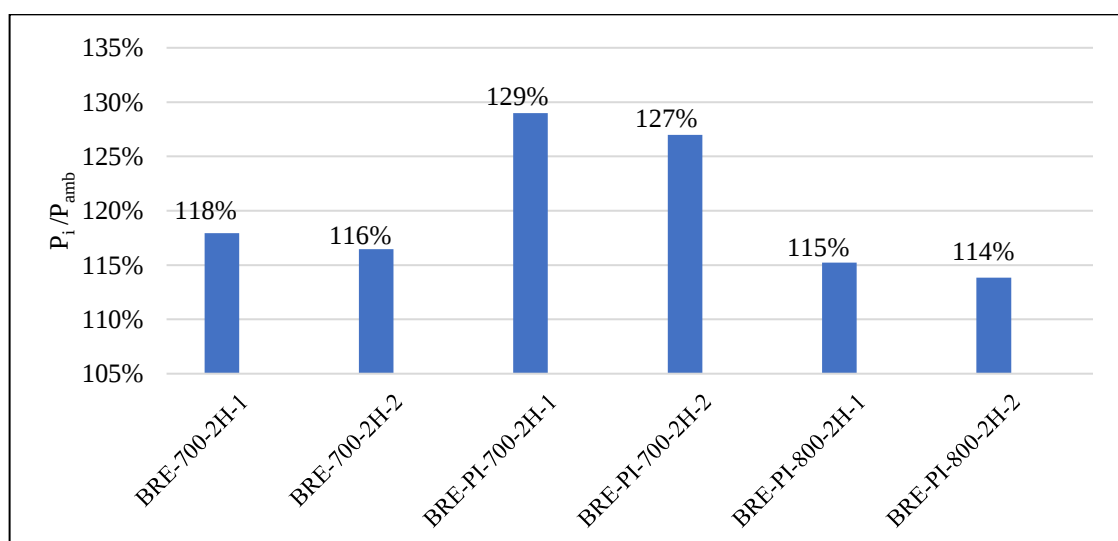


(c) Usando isolamento parcial e adesivo epóxi após exposição a 800 °C.

Fonte: Adaptado Jaddoe (2018a)

Diante da Figura 25, observa-se que todas as vigas recuperaram a capacidade de carga quando se utilizou reparo com adesivo epóxi e reforço com laminados de CFRP, depois do aquecimento das vigas, independente do dano do incêndio (700 °C e 800 °C) e do uso ou não do isolamento na superfície do concreto. No entanto, com a elevação do aquecimento ocorreu a redução da capacidade de carga.

Figura 25 – Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Jaddoe et al. (2018a)

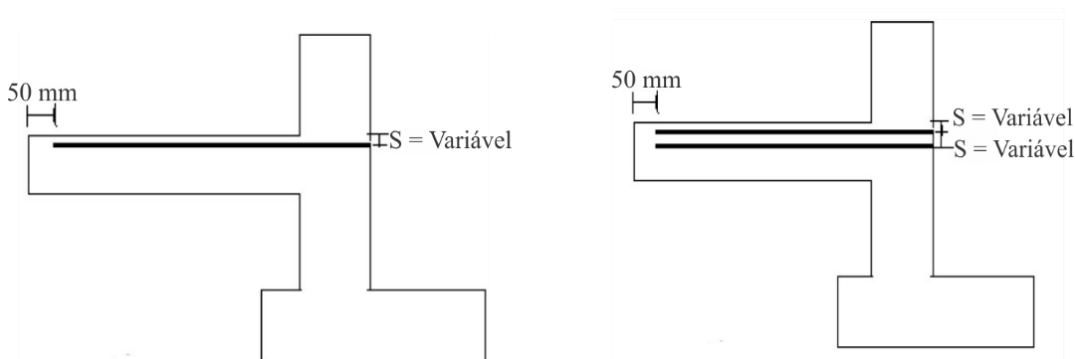


Fonte: A autora (2024)

3.1.5 Ashteyat et al. (2020)

Apresenta reforço com fibra de carbono por meio da técnica SNSM (*side near-surface mounted*) utilizando adesivo epóxi, a fim de aumentar a resistência a flexão de vigas em balanço de concreto autoadensável (em forma de L com 150x150x750 mm), depois incêndio. São estudadas 12 vigas de CA, dentre elas, tem-se corpos de prova expostas a temperatura elevadas temperaturas (400 e 500 °C), mantidas por duas horas, resfriadas e depois reforçadas com laminados de CFRP (Figura 26), também a viga deixada a temperatura ambiente como referência.

Figura 26 – Modelo reforço das amostras



Fonte: Adaptado Ashteyat et al. (2020)

A taxa de aquecimento do forno foi rápida e não seguiu nenhuma curva de incêndio padrão. As vigas em balanço são aquecidas de posteriormente reforçadas à flexão com laminados ($15 \times 2,5$ mm) de SNSM CFRP, inseridas em ranhuras laterais longitudinais, localizadas a 25 ou 60 mm da fibra da tensão superior das vigas. Além de vigas reforçadas com laminados duplos inseridas nas ranhuras de 60 mm ou em ranhuras duplicadas separadas por 35 mm. A distribuição das vigas é vista na Tabela 7.

Tabela 7 – Identificação de amostras do trabalho de Asheteyat et al. (2020)

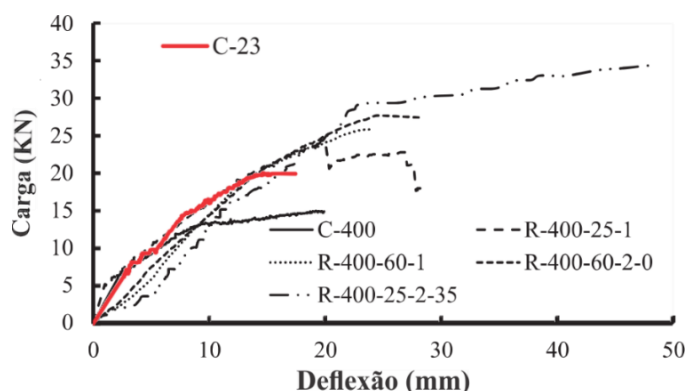
ID	Temperatura (°C)	Reforço NSM CFRP	Nº laminados	Distância da fibra de tensão superior das vigas (mm)	Espaçamen to entre laminados (mm)
C23	23	Não	-	-	-
R-400-25-1	400	Sim	1	25	-
R-400-60-1	400	Sim	1	60	-
R-400-60-2-0	400	Sim	2	60	0
R-400-25-2-35	400	Sim	2	25	35
R-500-25-1	500	Sim	1	25	-
R-500-60-2-0	500	Sim	2	60	0

Fonte: Adaptado Asheteyat et al. (2020)

Comportamento mecânico foi realizado sob carregamento estático de um ponto atuando nas extremidades das vigas, sendo o teste de carga de dois pontos. Os parâmetros analisados, tem-se: quantidade de laminados, a localização do reforço e a temperatura de aquecimento.

Para as vigas em balanço, aquecidas e seguidamente reforçadas a flexão, a localização dos laminados de SNSM CFRP e a temperatura de dano, influencia o desempenho mecânico da peça. As vigas aquecidas a 400 °C e 500°C, seguidamente reforçadas a flexão, apresentaram a capacidade final em até 35 kN (173%), para viga R-400-25-2-35 e 25 kN (125%), para a peça R-500-60-2-0, respectivamente. Ademais, ocorreu a recuperação da rigidez inicial, constatou-se por meio da sobreposição dos gráficos (400 °C) (Figura 27).

Figura 27 – Curva carga-deflexão



Fonte: Adaptado Asheteyat et al. (2020)

A reabilitação de vigas em balanço danificadas pelo calor usando laminados SNSM CFRP, apresentam mesmo tipo de falha, ruptura por flexão. As vigas pós aquecimento de 400 e 500°C, com diferentes configurações de reforço, apresentaram falha devido o descascamento do concreto na região do laminado (Figura 28).

Figura 28 – Modos de falha

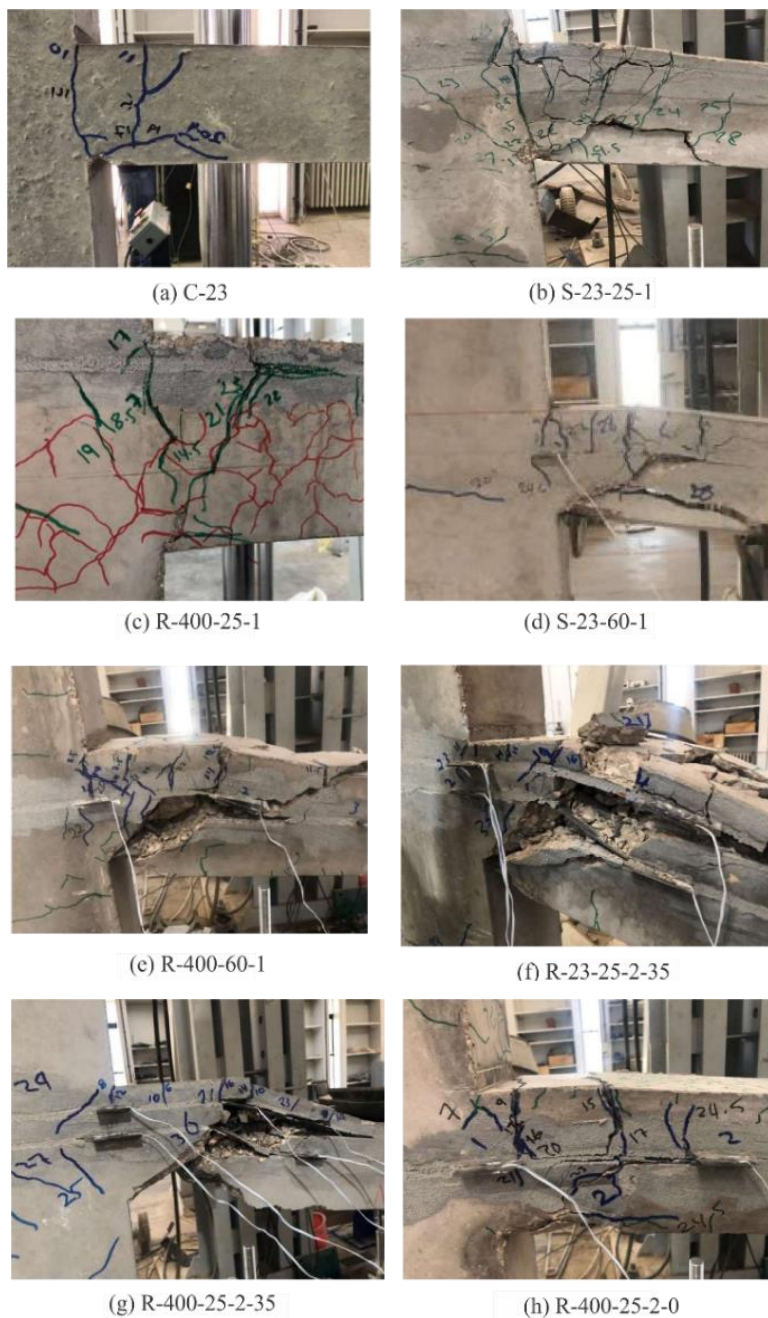


Figura 28 – Modos de falha

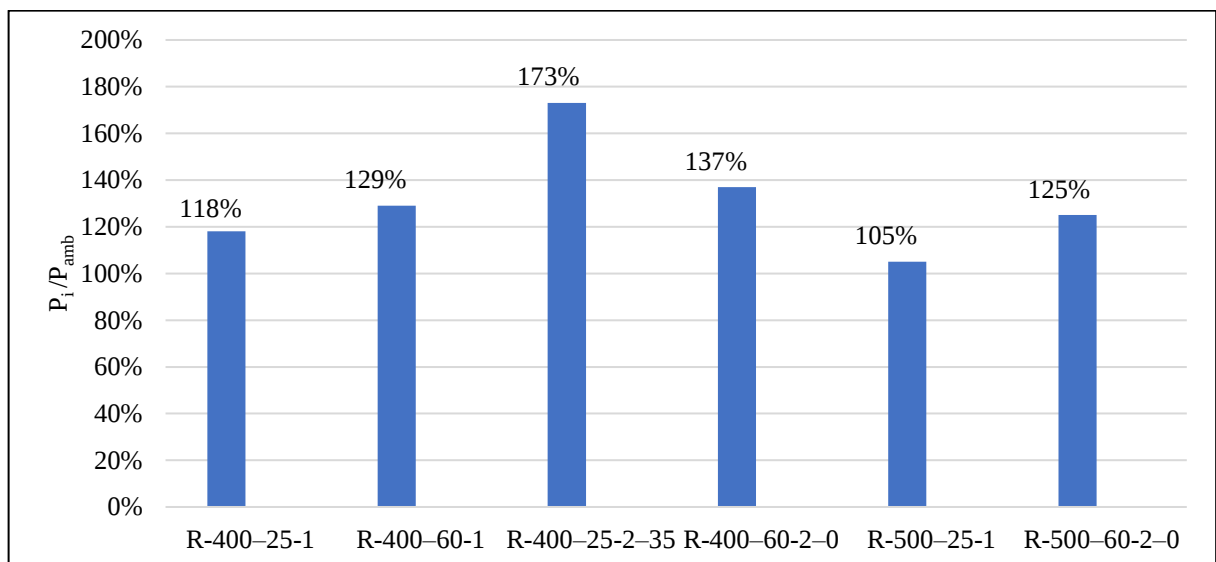


(i) R-500-25-2-0

Fonte: Adaptado Ashteyat et al. (2020)

Segundo a Figura 29, analise-se que a capacidade de carga residual das vigas, depois de reforçadas com laminados de CFRP é inversamente proporcional ao aumento ao dano de temperatura. Além disso, observa-se que quando o reforço dos laminados é localizado mais próximo da superfície superior da viga e quando tem maior quantidade de laminados, a capacidade residual de carga é elevada. O espaçamento entre os laminados que proporcionou maior capacidade de carga foi quando espaçado com 35 mm.

Figura 29 – Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Ashteyat et al. (2020)



Fonte: A autora (2024)

3.1.6 Jadooe et al. (2018b)

Esta pesquisa realizou um programa experimental e numérico com disposição de analisar o comportamento de vigas de CA após incêndio de 700°C e 800°C, por duas horas, sob curva da ISO 834 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, e adesivo cimentício. O total de 12 vigas ($140 \times 260 \times 2700$ mm) foram confeccionadas, dentre elas viga de referência em temperatura ambiente e vigas após incêndio reparadas com adesivo a base de cimento, por meio do reforço NSM laminados CFRP, com e sem isolamento. A distribuição das vigas é observada na Tabela 8. A resposta mecânica deu-se pelo ensaio de carregamento de quatro pontos. Configuração do reforço Figura 11.

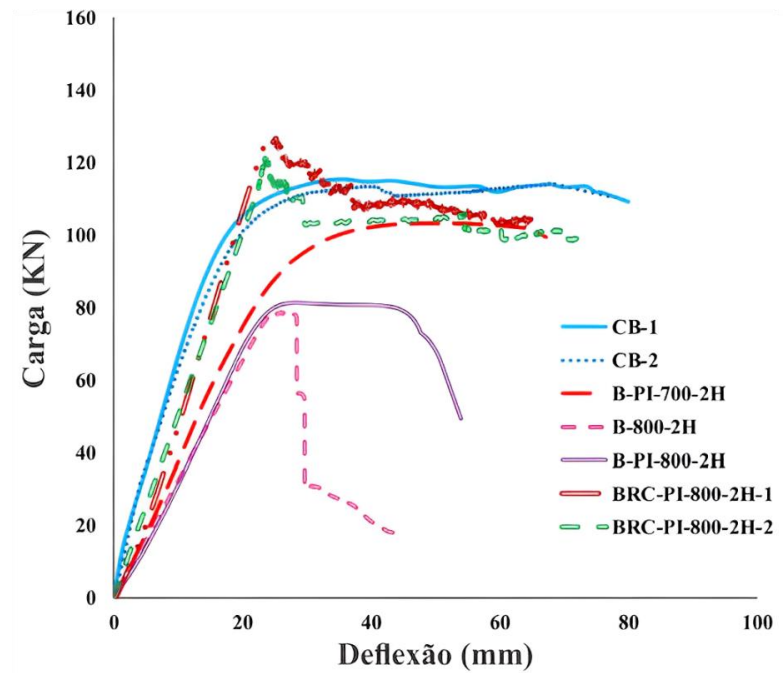
Tabela 8 – Identificação de amostras do trabalho de Jadooe et al. (2018a).

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

Fonte: Adaptado Jadooe et al. (2018a).

O dano devido a exposição a 700 °C, para viga BRC-PI-700-2h-1, recuperou a capacidade carga residual com 136 kN (119%). Para o dano de aquecimento de 800 °C a peça BRC-PI-800-2h-1 recuperou a carga de ruptura com 127 kN (110%). A rigidez inicial foi recuperada para todas as amostras aquecidas e depois reforçadas com fibra de carbono (Figura 30).

Figura 30 – Curva carga-deflexão



Fonte: Adaptado Jadooe et al. (2018b)

Todas as vigas romperam a flexão. As vigas reforçadas com adesivo cimentício ocorreu separação parcial do cobrimento de concreto seguida de ruptura do concreto (Figura 31).

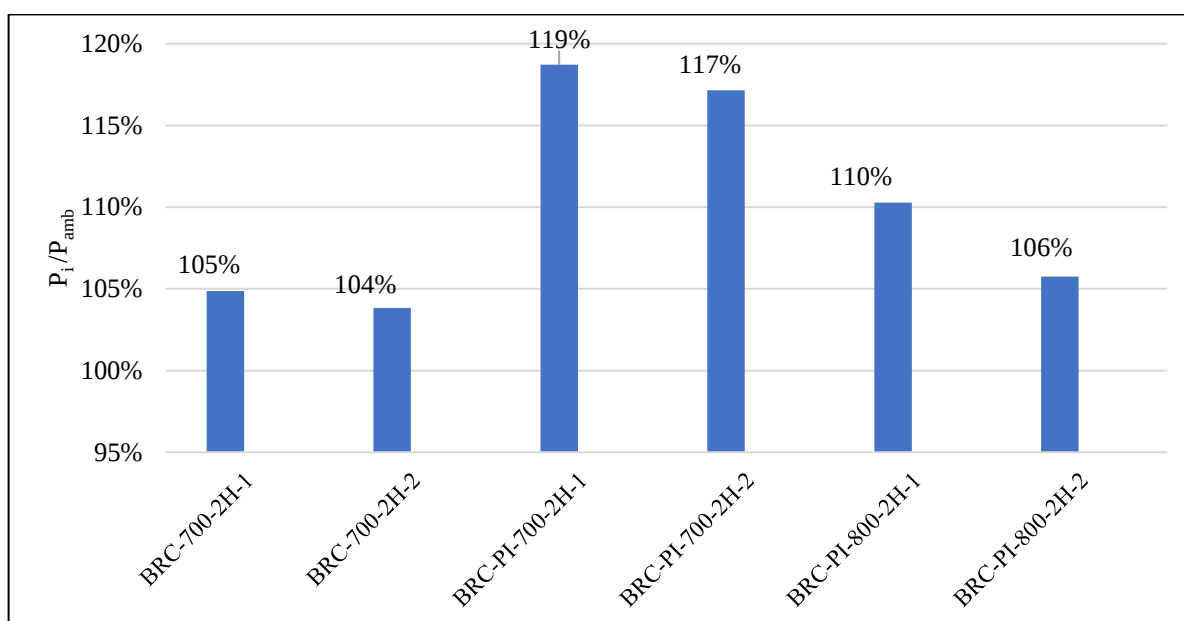
Figura 31 – Modo de falha



Fonte: Adaptado Jadooe et al. (2018b)

Consoante a Figura 32, todas as vigas após incêndio e depois reparadas com adesivo cimentício, e então reforçadas com laminados de CFRP, recuperaram a capacidade de carga última, independente do uso ou não de isolamento da superfície do concreto, e do dano de temperatura (700 °C e 800 °C). No entanto, com o aumento do aquecimento ocorreu a diminuição da capacidade de carga.

Figura 32 – Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Jadooe et al. (2018b)

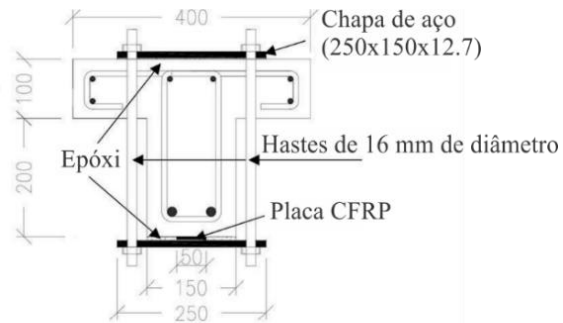


Fonte: A autora (2024)

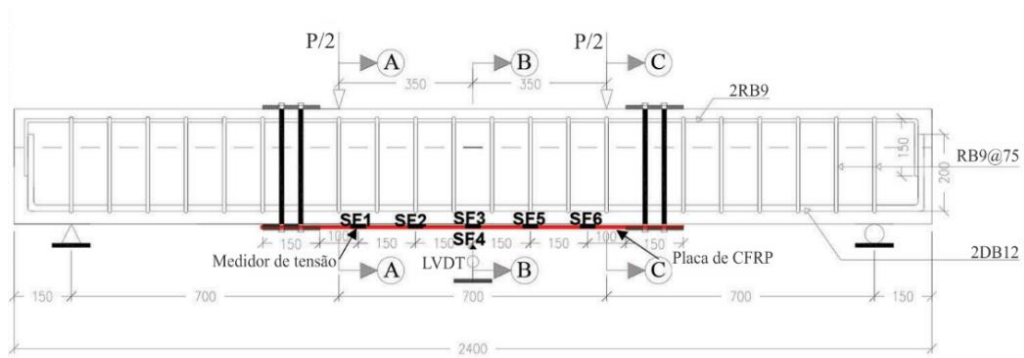
3.1.7 Lenwari et al. (2020)

Este trabalho apresenta o desempenho de vigas de CA após danificadas ao calor, sob a curva de incêndio padrão ISO 834, por três horas, resfriadas e então reforçadas à flexão com placas de CFRP ($1,2 \times 50$ mm), colados externamente ao concreto com cola epóxi. No total de 15 vigas T, 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 m, foram confeccionadas, com objetivo de analisar o desempenho cíclico, por meio do teste de quatro pontos com descargas e recargas periódicas até a ruptura. Dentre as vigas deste estudo, tem-se viga de controle em temperatura ambiente e vigas expostas a elevadas temperaturas (700 ou 900°C), e depois reforçadas com laminados de CFRP curtas (1100 mm de comprimento) ou longas (1800 mm de comprimento). O modelo de reforço pode ser visualizado na Figura 33 e a nomenclatura das vigas na Tabela 9.

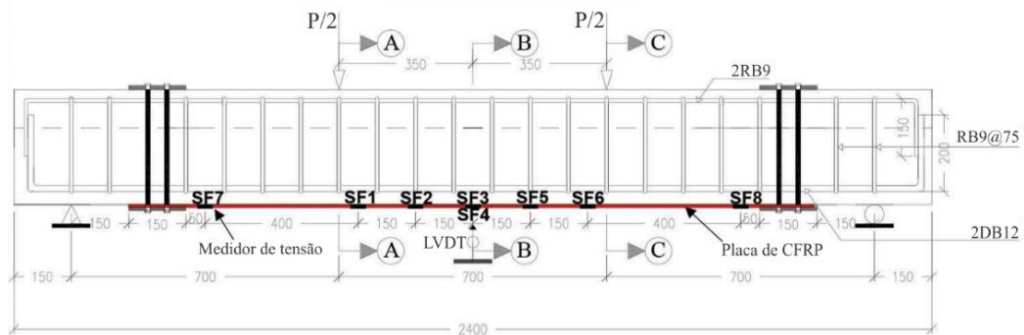
Figura 33 – Modelos do reforço na viga



(a) Ancoragem final



(b) Placa curta de CFRP



(c) Placa longa de CFRP

Fonte: Adaptado Lenwari et al. (2020)

Tabela 9 – Identificação de amostras do trabalho de Lenwari et al. (2020)

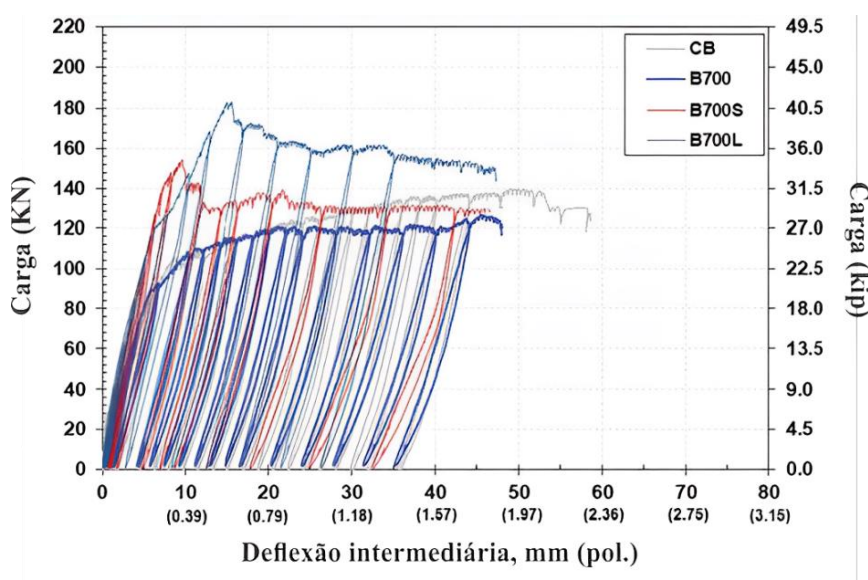
ID	Temperatura (°C)	Reforço NSM CFRP	Comprimento do laminado (mm)	Tipo de comprimento
CB	35	Não	-	-
B700S	700	Sim	1100	Curto
B700L	700	Sim	1800	Longo
B900S	900	Sim	1100	Curto
B900L	900	Sim	1800	Longo

Fonte: Adaptado Lenwari et al. (2020)

A viga B700S alcançou recuperação da carga de ruptura de 154 kN (110%) e a peça B700L de 183 kN (131%). Para as peças aquecidas a 900 °C e depois reforçadas, recuperaram até 151 kN (108%) e 167 kN (119%), B900S e B900L, respectivamente. Em relação à rigidez, as vigas aquecidas a 700°C, resfriadas e depois reforçadas com laminados de CFRP, recuperaram a rigidez inicial, sendo possível observar por meio do gráfico carga-deflexão da Figura 34.

As estruturas pós aquecidas e reparadas independentes de comprimento curto ou longo de CFRP aquecidas a 700° ou 900 °C, e depois reforçadas com CFRP, evidenciaram falha por descolamento intermediário induzido por fissuras.

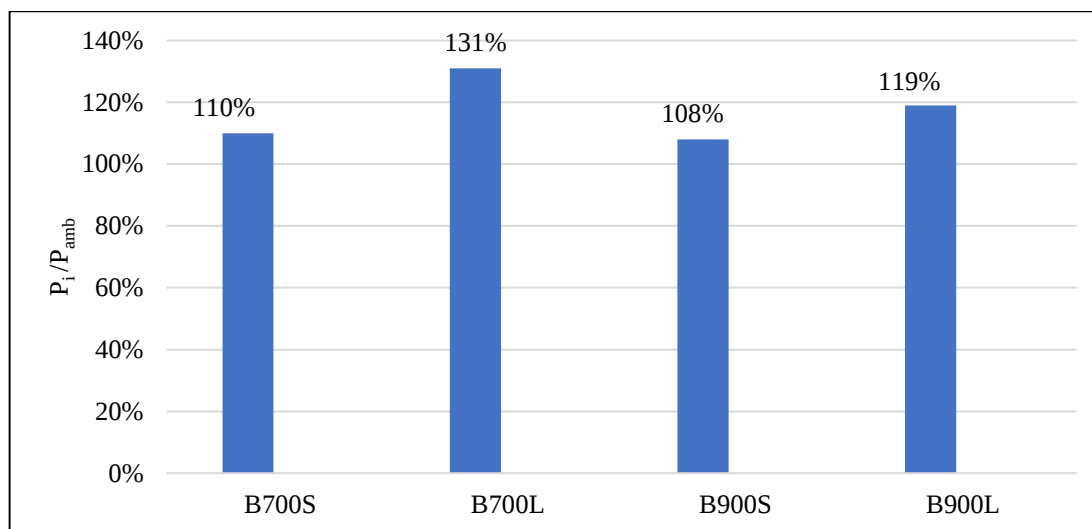
Figura 34 – Relações carga-deflexão no meio do vão de vigas expostas a 700 °C



Fonte: Lenwari et al. (2020)

Por meio da Figura 35, constatou-se que o aumento do comprimento do laminado de CFRP, para as vigas reforçadas depois do aquecimento, apresentaram maior capacidade de carga residual. Além de evidenciar a redução da capacidade residual com a elevação do dano de aquecimento.

Figura 35 – Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Lenwari et al. (2020)



Fonte: A autora (2024)

3.1.8 Haddad e Yaghmour (2020)

Apresentam o estudo da eficiência de laminados de CFRP montada utilizando a técnica SNSM (*side near-surface mounted*), utilizando adesivo epóxi, com diferentes configurações de reforço à flexão em vigas de concreto armado após dano ao calor, com propósito de recuperar o desempenho estrutural. Foram moldadas 11 vigas de CA (150 mm × 250 mm × 1400 mm) e aquecidas (400-500°C), por três horas, a taxa de aquecimento não obedeceu a nenhuma curva de incêndio padrão, evidenciando um aquecimento muito lento. Posteriormente foram reforçadas utilizando laminados (15 mm × 2,5 mm) SNSM CFRP com diferentes perfis, sendo eles: reto, parabólico e trapezoidais (Figura 36).

Figura 36 – Ranhura em diferentes perfis



Fonte: Adaptado Haddad e Yaghmour (2020)

Dentre as vigas analisadas, estão a viga de controle em temperatura ambiente e as vigas reforçadas com SNSM laminados CFRP, distribuídas conforme a Tabela 10. Todas as peças, foram submetidas a resposta mecânica à flexão das vigas, por meio de teste de carga de quatro pontos.

Tabela 10 – Identificação de amostras do trabalho de Haddad e Yaghmour (2020).

ID	Forma de Perfil	Temperatura (°C)	Reforço SNSM CFRP
C	Nenhum	23	Não
RHD400-TZ ₁₅ -C ₂₅	Trapezoidal ângulo 15°	400	Sim
RHD400-P-C ₂₅	Parabólico	400	Sim
RHD400-TZEx ₁₅ -C ₂₅	Trapezoidal externa ângulo 15°	400	Sim
RHD500-TZ ₁₅ -C ₂₅	Trapezoidal ângulo 15°	500	Sim
RHD500-TZ ₂₀ -C ₂₅	Trapezoidal ângulo 20°	500	Sim
RHD500-P-C ₂₅	Parabólico	500	Sim
RHD500-TZEx ₁₅ -C ₂₅	Trapezoidal externa ângulo 15°	500	Sim
RHD500-S-C ₂₅	Linha reta	500	Sim

Fonte: Adaptado de Haddad e Yaghmour (2020).

O uso de perfis trapezoidais externos (RHD400-TZEx₁₅-C₂₅) e internos (RHD500-TZ₁₅-C₂₅) para reparar as vigas depois de aquecidas a 400 °C e resfriadas, proporcionaram recuperação do desempenho da capacidade de carga de 309 kN (165%) e de rigidez 166%, para aquecidas a 500 °C, 267 kN e 143%, para capacidade de carga e rigidez, respectivamente.

Os diferentes perfis do reparo SNSM CFRP em vigas pós fogo, apresentou diferentes modos de falha. Vigas aquecida a 400 °C e depois reparadas com perfis de ângulo trapezoidal (RHD400-TZEx₁₅-C₂₅ e RHD400-TZ₁₅-C₂₅) ruptura típica por flexão, perfil parabólico (RHD400-P-C₂₅) falha por separação do concreto e os laminados de SNSM CFRP.

Ademais, vigas aquecidas a 500°C e depois reparadas com diferentes perfis, apresentam falha por flexão. Com perfil trapezoidal 15°(RHD500-TZ₁₅-C₂₅) e trapezoidal de 20° (RHD500-TZ₂₀-C₂₅), a primeira ocorreu separação do cobrimento de concreto e região da armadura e depois esmagamento com concreto compacto. A segunda apresenta rutura típica por flexão. Viga com reparo em linha reta (RHD500-S-C₂₅) e trapezoidal externo de 15° (RHD500-TZEx₁₅-C₂₅), começou a separação da extremidade do cobrimento de concreto e nível da armadura, levando a ruptura por cisalhamento. No entanto a viga com reforço parabólico destacou por flexão típica depois fissuração ao cisalhamento, logo após com esmagamento do concreto. Modos de falha, observar Figura 37.

Figura 37 – Modos de falha



(a) Vista longitudinal na viga RHD₄₀₀-TZ₁₅-C₂₅



(b) Vista longitudinal na viga RHD₄₀₀-P-C₂₅



(c) Vista longitudinal na viga RHD₄₀₀-TZEX₁₅-C₂₅

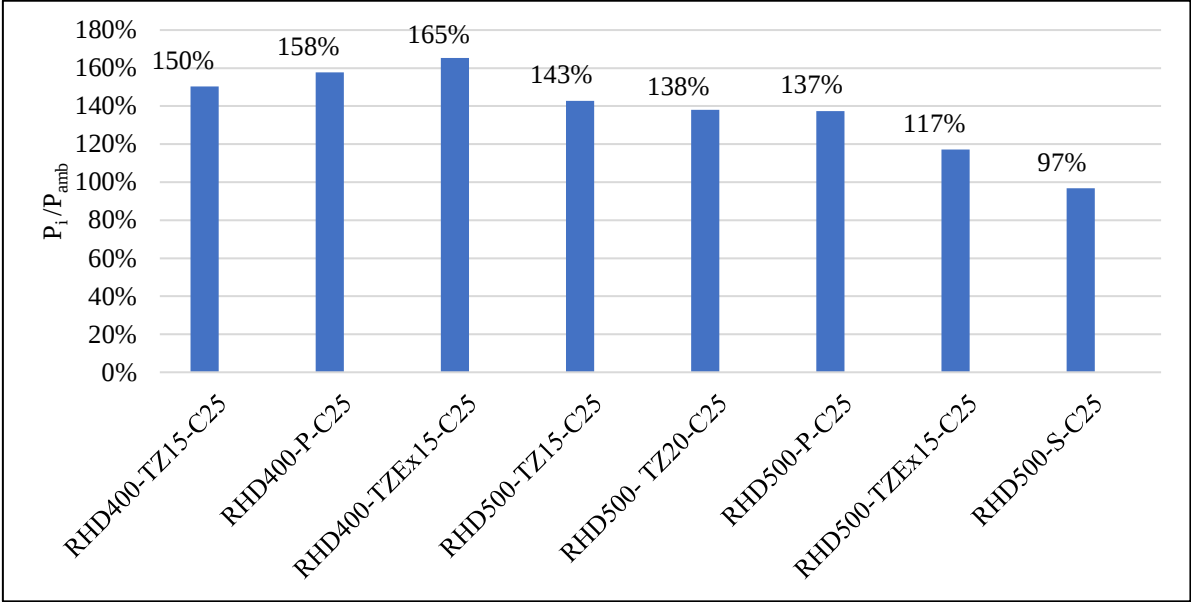
Figura 37 – Modos de falha

(d) Vista longitudinal na viga RHD₅₀₀-TZ₁₅-C₂₅(e) Vista longitudinal na viga RHD₅₀₀-TZ₂₅-C₂₅(f) Vista longitudinal na viga RHD₅₀₀-S-C₂₅(g) Vista longitudinal na viga RHD₅₀₀-P-C₂₅(h) Vista longitudinal na viga RHD₅₀₀-TZEX₁₅-C₂₅

Fonte: Adaptado Haddad e Yaghmour (2020)

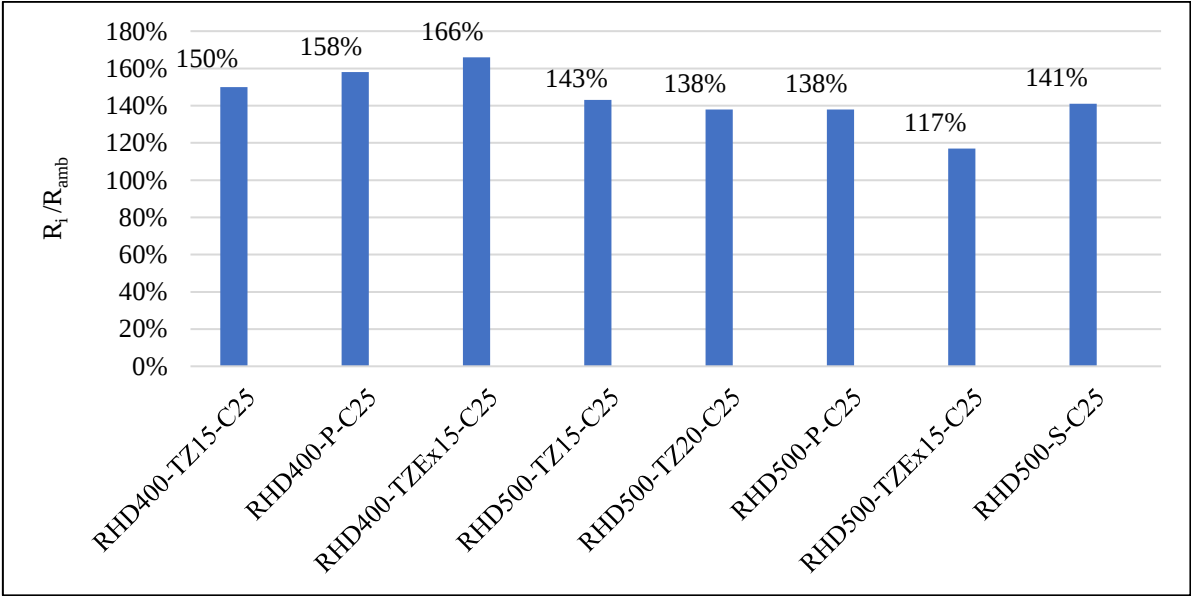
Após exposição às temperaturas elevadas e depois reforçadas à flexão, diferentes esquemas de reparação contribuíram para evitar/reduzir a tendência PO e elevar o desempenho mecânico das vigas. As vigas aquecidas e seguidas de reforços, em maioria, recuperaram a capacidade de carga, com exceção da viga RHD500-S-C₂₅ (Figura 38) com recuperação de 97% da capacidade de carga, entretanto a rigidez foi recuperada com 141% (Figura 39).

Figura 38 – Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Haddad e Yaghmour (2020)



Fonte: A autora (2024)

Figura 39 – Percentual da capacidade de rigidez residual das vigas ensaiadas de Haddad e Yaghmour (2020)

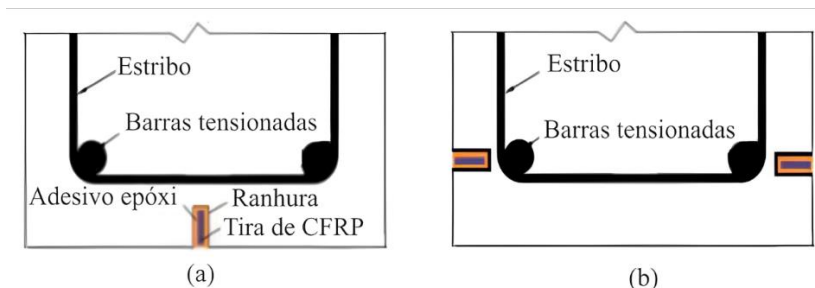


Fonte: A autora (2024)

3.1.9 Barham et al. (2022)

Apresentam estudo do comportamento de vigas de CA, com concreto de agregado reciclado (CAR), danificados pelo calor, com aproximadamente, nos 10 minutos iniciais, a taxa de 40°/min e em seguida constante. Após aquecidas as vigas são reforçadas à flexão com laminados (15 × 2,5 mm) de NSM CFRP, com um laminado no fundo da viga ou com dois laminados, um em cada lado da viga Figura 40.

Figura 40 –Desenho esquemático das configurações de reparo: a) Laminados único concentrada no intradorso (S1), b) Dois laminados nas laterais, um de cada lado (S2).



Fonte: Adaptado Barham et al. (2022)

Foram realizadas 16 vigas (100 mm × 150 mm × 1150 mm), dentre elas, viga de controle exposta a 25°C e vigas aquecidas a 400°C, por três horas, resfriadas e então reforçadas com laminados de CFRP. Ademais, as vigas continham em sua composição substituição de agregado reciclado em diferentes volumetrias (0%, 25% e 50%) de Agregados Grossos de Concreto Reciclado (ACR). Desse modo, os espécimes foram ensaiados em um ensaio de flexão de quatro pontos, para analisar a resposta mecânica. A distribuição das vigas pode ser vista na Tabela 11.

Tabela 11 – Identificação de amostras do trabalho de Barham et al. (2022)

ID	Tipo de concreto	Taxa de substituição (%)	Temperatura (°C)	Configuração de reforço
B-N-T25-C	Natural	0	25	-
B-N-T400-S1	Natural	0	400	Um laminado na parte inferior
B-N-T400-S2	Natural	0	400	Dois laminados nas laterais
B-N-R25-T400-S1	CAR	25	400	Um laminado na parte inferior
B-N-R50-T400-S1	CAR	50	400	Um laminado na parte inferior
B-N-R50-T400-S2	CAR	50	400	Dois laminados nas laterais

Fonte: Adaptado de Barham et al. (2022)

Percebeu-se que a maior recuperação da capacidade de carga ocorreu quando reforçada com dois laminados laterais (B-N-T400-S2) com recuperação de até 66 kN (145%), enquanto a recuperação com reforço utilizando um laminado no inferior da viga (B-N-T400-S1) obteve recuperação da capacidade de carga de até 63kN (141%).

O comportamento de vigas de concreto de agregado reciclado, danificadas pelo calor, resfriadas e depois reparadas com laminados NSMCFRP apresentaram diferentes modos de falhas a depender da porcentagem de agregados grossos de concreto reciclado (ACR) e das configurações de reparo (Figura 42). Para os espécimes B-N-T400-S1 e B-R25-T400-S, apresentou falha por fissuras horizontais e ocasionaram a separação parcial do recobrimento com descolamento local do concreto e o adesivo epóxi, seguido de esmagamento do concreto.

O corpo de prova B-R25-T400-S2, ocorreu falha por escoamento do aço e depois esmagamento do concreto. Para vigas B-R50- T400-S1e B-R25- T400-S2, falha por fissuras horizontais com separação parcial do recobrimento e descolamento local do concreto/epóxi, seguido de ruptura por cisalhamento. A Figura 41 apresenta os modos de falha das vigas aquecidas e depois reforçadas.

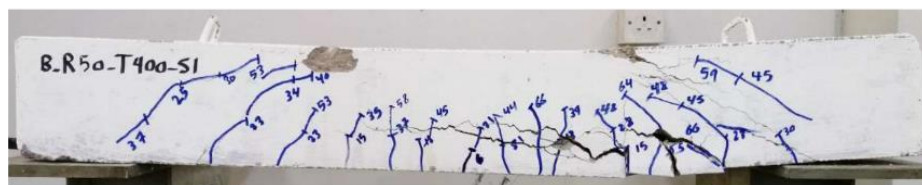
Figura 41 – Modelo aderência-deslizamento encontrado experimentalmente



(a) B-N-T400-S1, carregamento de trincas

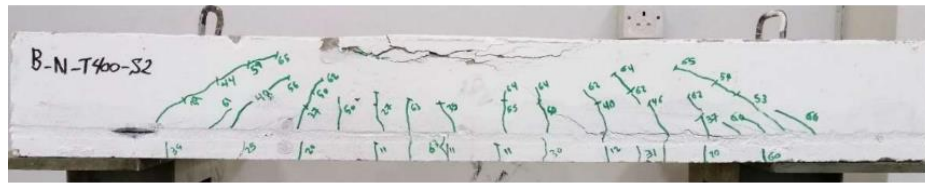


(b) B-R25-T400-S1, carregamento de trincas

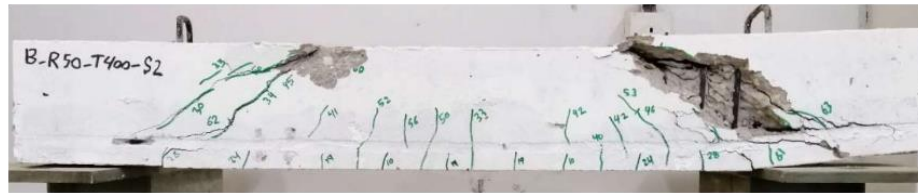


(c) B-R50-T400-S1, carregamento de trincas

Figura 41 – Modelo aderência-deslizamento encontrado experimentalmente



(d) B-N-T400-S2, carregamento de trincas

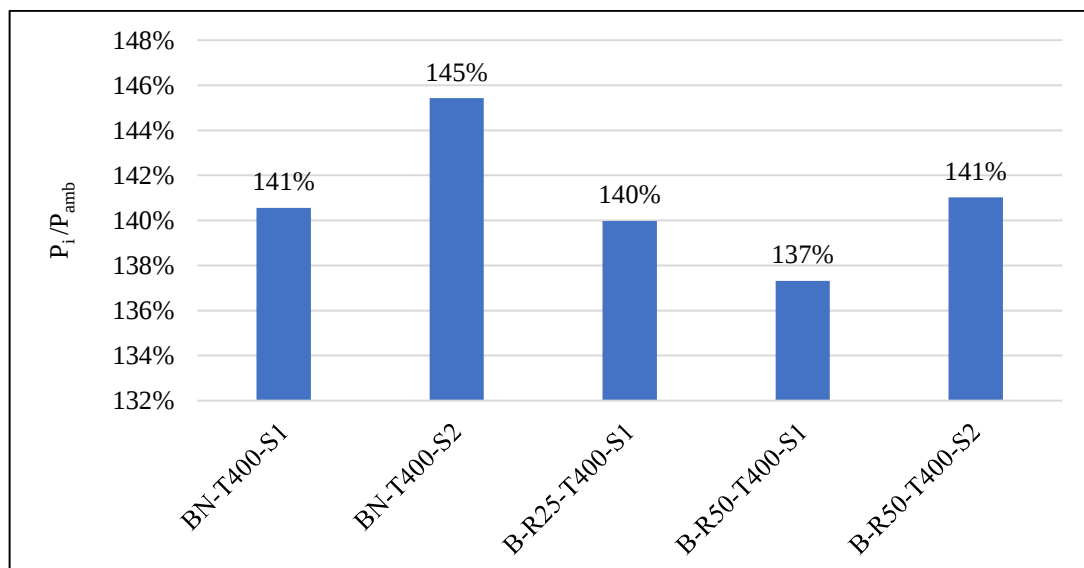


(e) B-R50-T400-S1, carregamento de trincas

Fonte: Adaptado Barham et al. (2022)

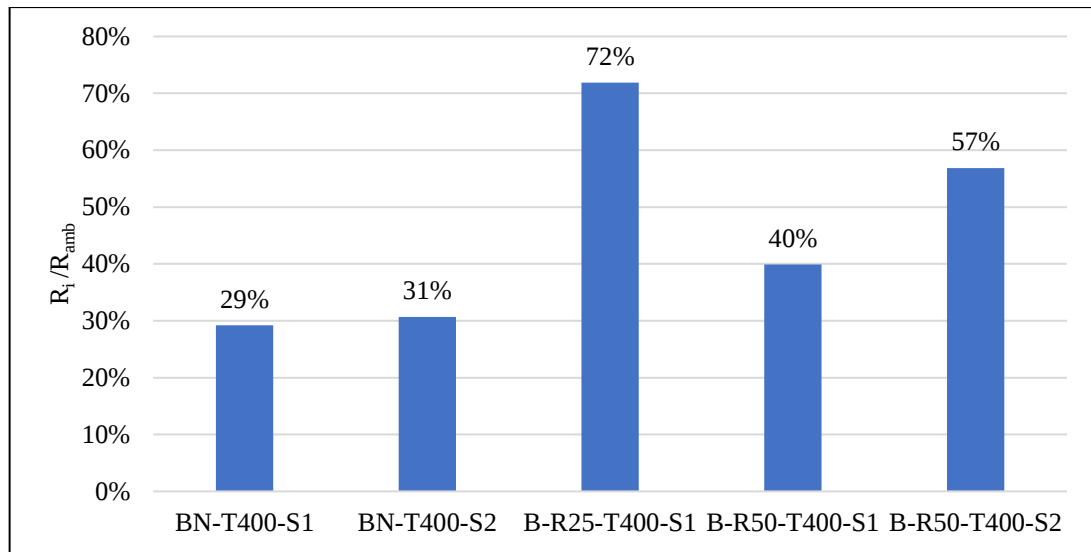
Diante da Figuras 42 e 43, analisou-se que quando acrescentado o agregado reciclado ao concreto (B-R25-T400-S1, B-R50-T400-S1 e B-R50-T400-S2) houve a redução da capacidade de carga das peças, mas aumentou o percentual da capacidade de rigidez. No entanto, em nenhum caso foi recuperada a rigidez.

Figura 42 – Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Barham et al. (2022)



Fonte: A autora (2024)

Figura 43 – Percentual da capacidade de rigidez residual das vigas ensaiadas de Barham et al. (2022)

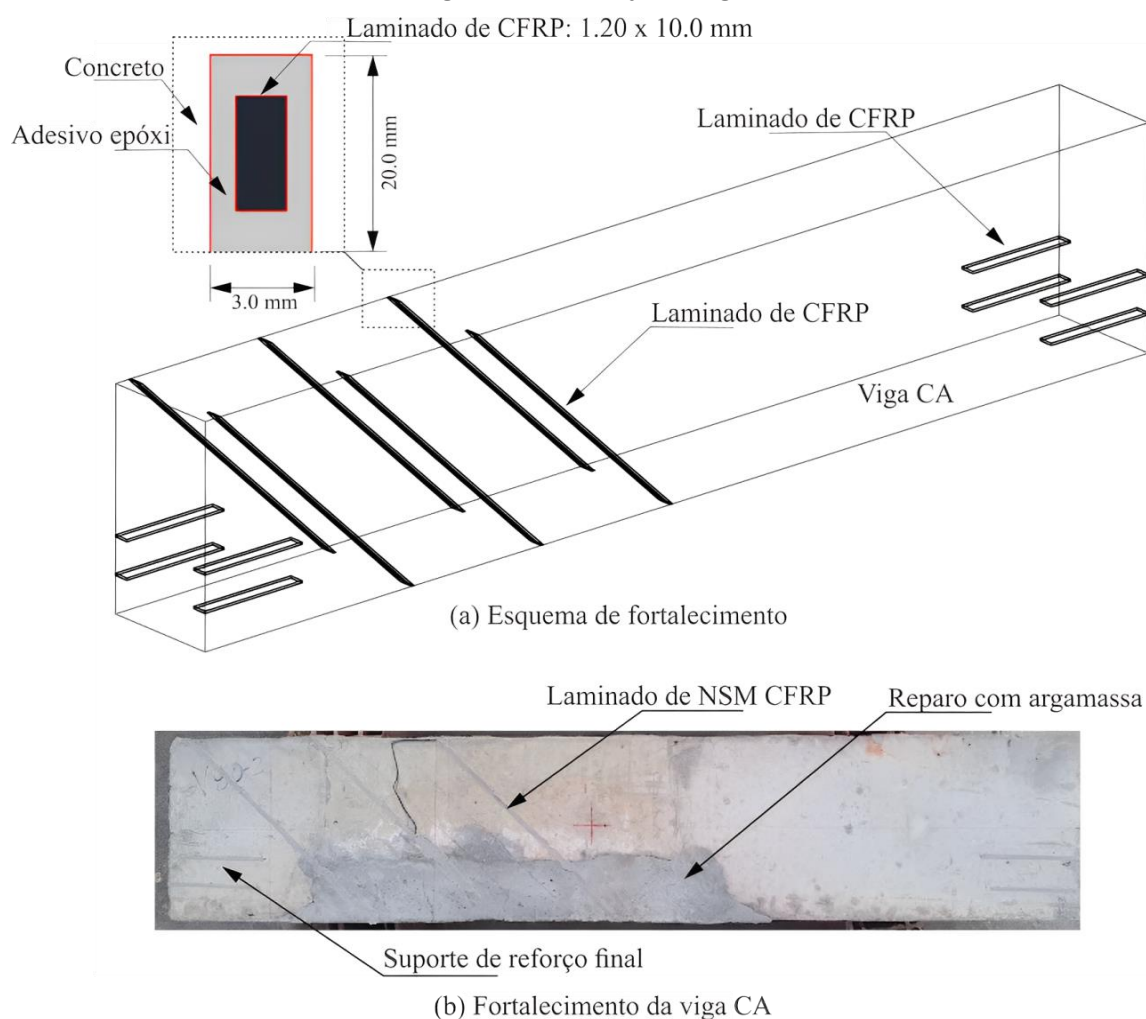


Fonte: A autora (2024)

3.1.10 Costa et al. (2023)

Tem como objetivo avaliar o reforço ao cisalhamento de vigas de CA danificadas pelo fogo com laminados de CFRP, através da técnica NSM e uso do adesivo epóxi. A configuração de reforço segue apresentada na Figura 44.

Figura 44 – Reforço da viga



Fonte: Adaptado Costa et al. (2023)

Foram um total de 13 vigas de CA (300 mm × 160 mm × 1460 mm) fabricadas e expostas a temperatura ambiente e submetidas por diferentes tempos de exposição ao fogo, 60, 90 e 120 min, seguindo a curva de incêndio padrão ISO-834. Após resfriamento as vigas foram reforçadas com variáveis de laminados (10 × 1,2 mm) de NSM CFRP, com espaçamentos de 75, 150 e 200 mm. A distribuição das vigas, conforme a Tabela 12. Dessa forma, com finalidade de analisar a capacidade residual de cisalhamento, as vigas foram submetidas ao teste de carga de três pontos.

Tabela 12 –Identificação de amostras do trabalho de Costa et al. (2023)

ID	Tempo de exposição (min)	Reforço NSM CFRP	Espaçamento (mm)
RCB _{0-NS}	0	Não	-
RCBS ₆₀₋₂₀₀	60	Sim	200
RCBS ₆₀₋₁₅₀	60	Sim	150
RCBS ₆₀₋₇₅	60	Sim	75
RCBS ₉₀₋₂₀₀	90	Sim	200
RCBS ₉₀₋₁₅₀	90	Sim	150
RCBS ₉₀₋₇₅	90	Sim	75
RCBS ₁₂₀₋₂₀₀	120	Sim	200
RCBS ₁₂₀₋₁₅₀	120	Sim	150
RCBS ₁₂₀₋₇₅	120	Sim	75

Fonte: Adaptado de Costa et al. (2023).

Conclui-se que para a maioria das vigas aquecidas e posteriormente reparadas NSM CFRP ao cisalhamento, ocorre recuperação da capacidade de cisalhamento inicial. Observa-se que a única viga que não recuperou a capacidade cisalhante inicial foi a viga aquecida a 120 min, e posteriormente reforçada com laminados com espaçamento de 200 mm (RCBS₁₂₀₋₂₀₀), que obteve capacidade de carga de 165 kN (78%).

Para as vigas reforçadas ao cisalhamento na região A (região com estribos com intervalo de 300 mm), após incêndio a diferentes tempos de exposições, através da técnica NSM CFRP e diferentes espaçamentos entre os laminados, observou-se diferentes modos de falha. As vigas RCBS₆₀₋₇₅, RCBS₉₀₋₁₅₀ e RCBS₁₂₀₋₁₅₀ Falharam pela combinação da descamação e cisalhamento na região A. Nas vigas RCBS₆₀₋₁₅₀ e RCBS₆₀₋₂₀₀, a falha foi somente devido ao cisalhamento da região A. Espécimes RCBS₉₀₋₇₅ e RCBS₁₂₀₋₇₅ apresentaram falha por descamação. Enquanto as vigas RCBS₉₀₋₂₀₀ e RCBS₁₂₀₋₂₀₀ constataram ruptura por cisalhamento na região A, com concreto comprimido. Os Modos de falhas descritos das vigas, consoante Figura 45.

Figura 45 – Modelo aderência-deslizamento encontrado experimentalmente

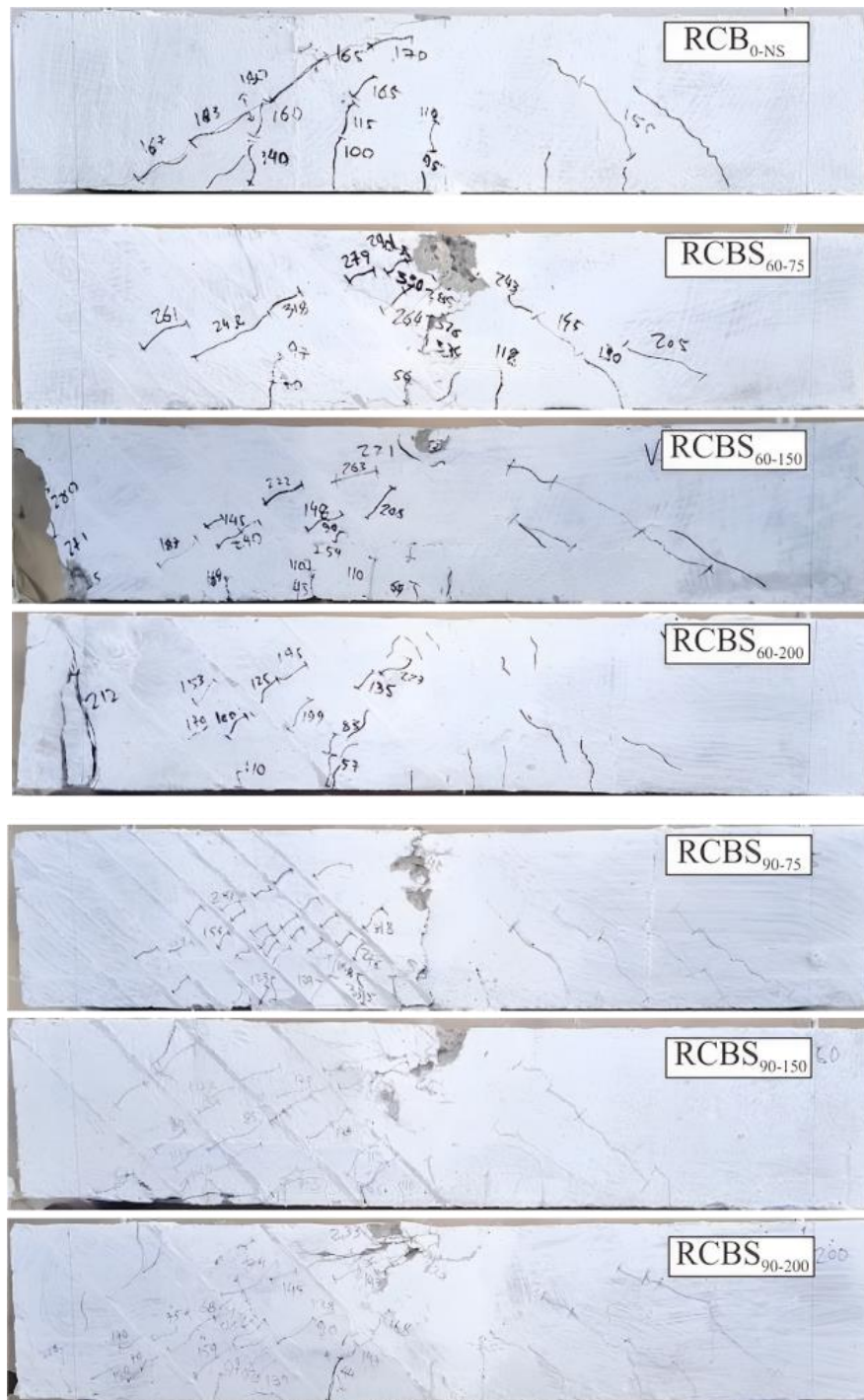
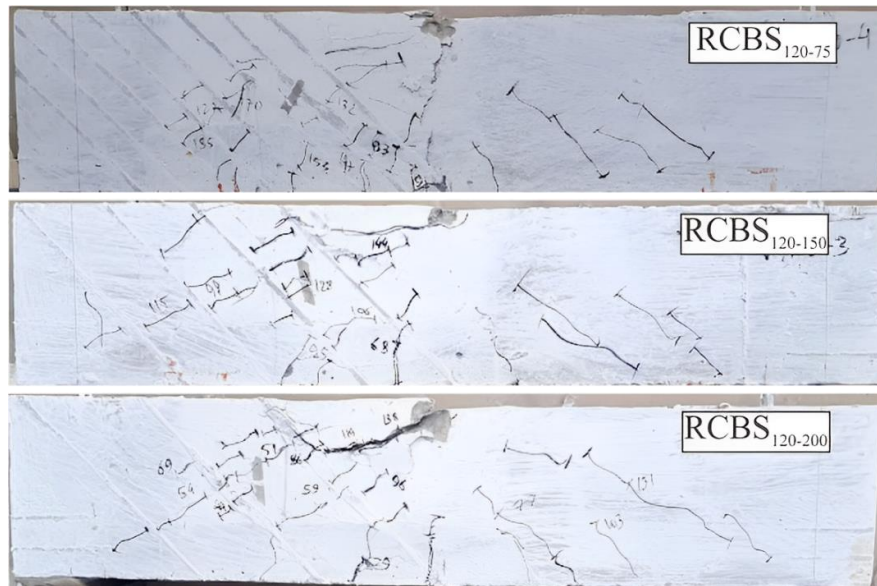


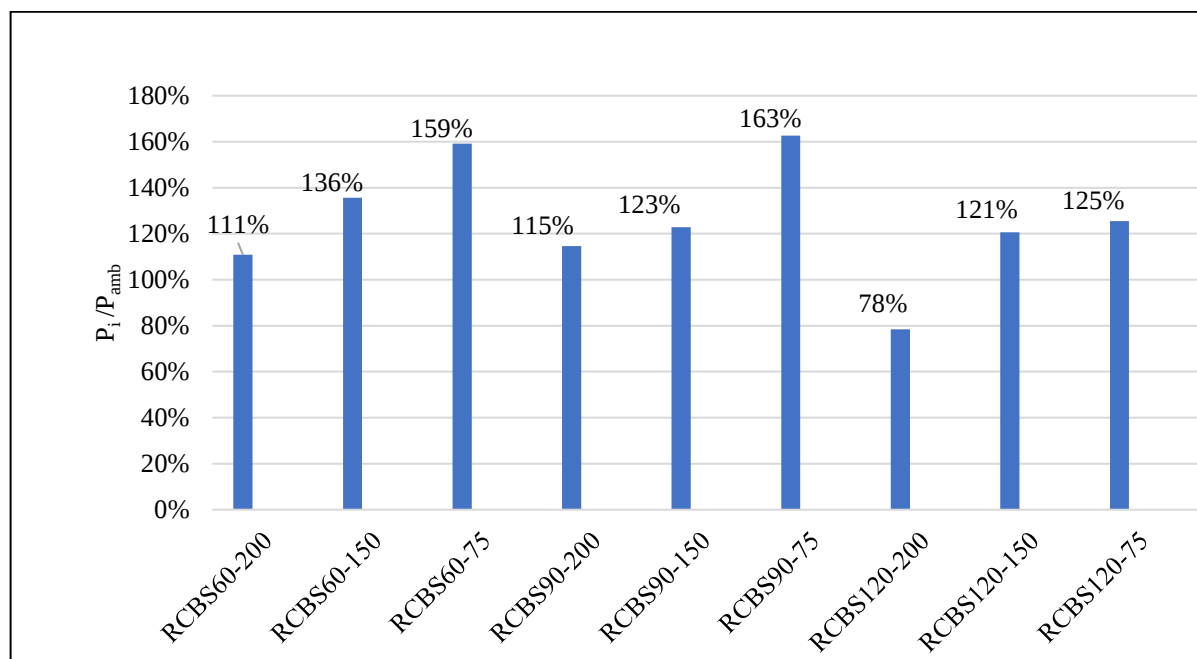
Figura 45 – Modelo aderência-deslizamento encontrado experimentalmente



Fonte: Adaptado Costa et al. (2023).

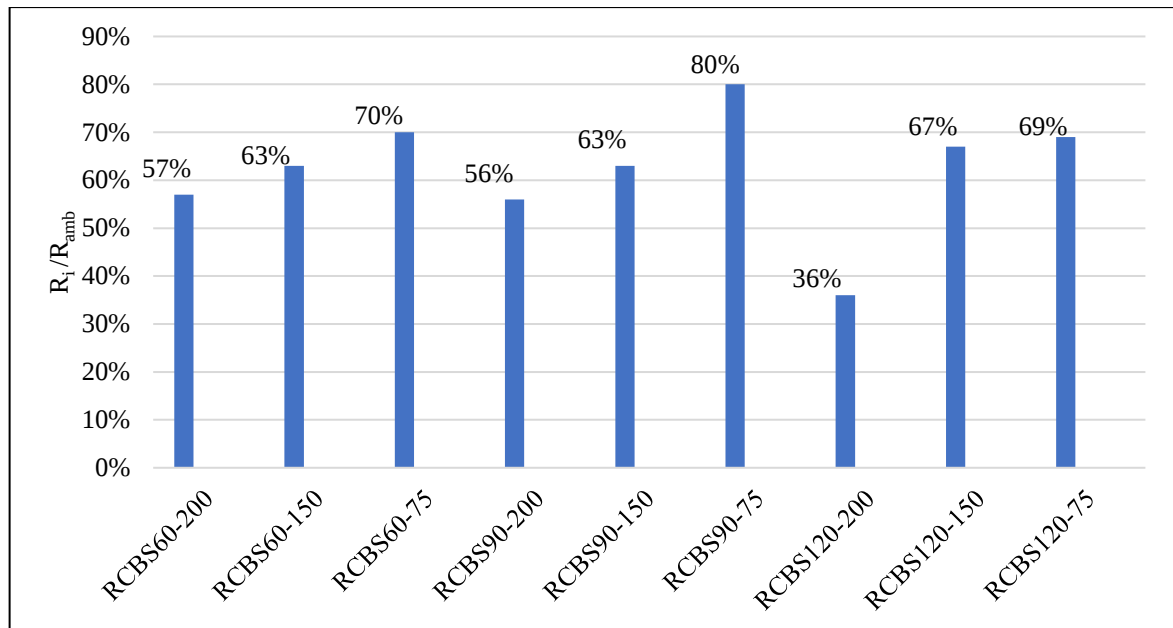
Conforme as Figuras 46 e 47, a redução dos espaçamentos entre os laminados aumentou a capacidade de carga residual e rigidez, das peças de CA aquecidas e depois reforçadas. Mas nenhuma recuperou a capacidade de rigidez.

Figura 46 – Percentual da capacidade de carga residual das vigas ensaiadas de Costa et al. (2023)



Fonte: A autora (2024)

Figura 47 – Percentual da capacidade de rigidez residual das vigas ensaiadas de Costa et al. (2023)

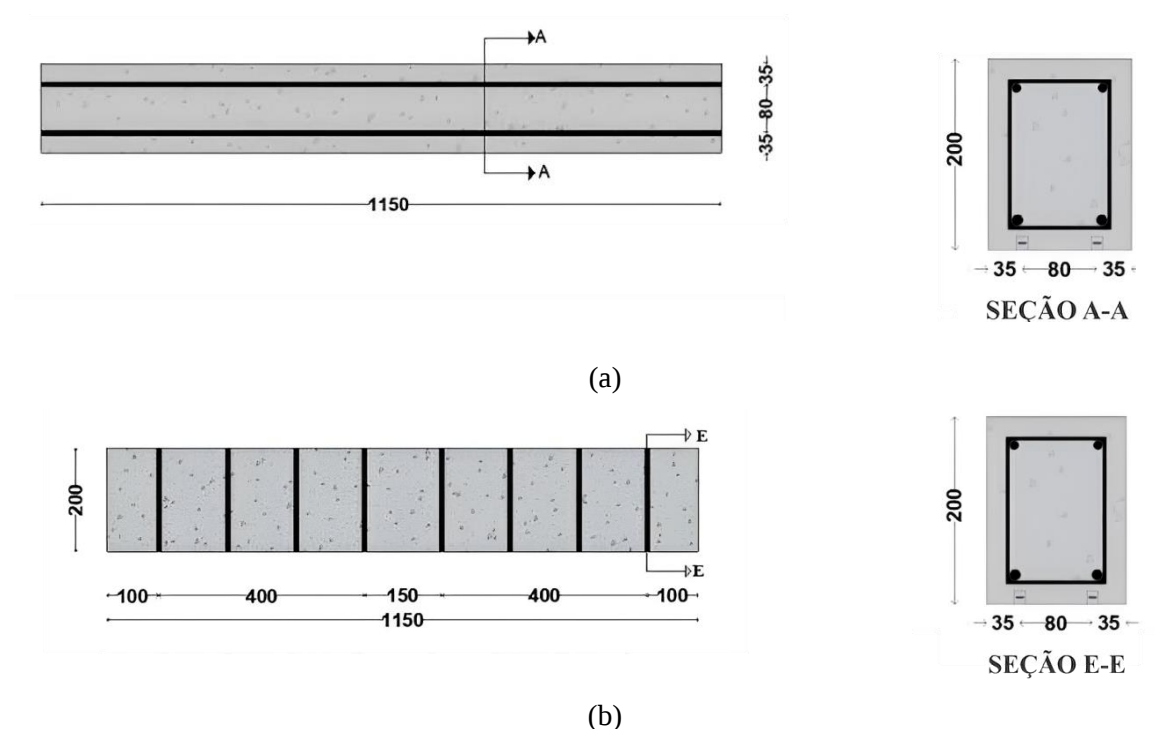


Fonte: A autora (2024)

3.1.11 Obaidat et al. (2023)

Estudam o comportamento vigas de CA (150 mm × 200 mm × 1150 mm) posteriormente a choques térmicos com reforço, utilizando laminados (200 × 0,166 mm), folhas e cabos NSM CFRP, com uso do adesivo epóxi, a fim de analisar o comportamento do reforço à flexão. No total 11 vigas foram estudadas, dentre os espécimes, viga de controle ambiente, viga aquecida a 600 °C, por três horas, e depois reforçada à flexão, com dois laminados de CFRP inferiores (Figura 48a), e outra viga de semelhante modo, com adição de reforço ao cortante de laminados CFRP (Figura 48b), para conduzir a falha por flexão.

Figura 48 – Modelo de reforço a) Vista inferior da viga e seção b) Vista lateral da viga e seção



Fonte: Obaidat et al. (2023)

A taxa de aquecimento das vigas aquecidas foi de aproximadamente, nas primeiras duas horas iniciais, de taxa de 300 °C/h e em seguida constante. Todos os espécimes foram testados sob carga de quatro pontos. A configuração das amostras é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 –Identificação de amostras do trabalho de Haddad e Almasaeid (2016)

ID	Temperatura (°C)	Reforço NSM CFRP	Configuração de reforço
C-23	23	Não	-
BS-600	60	Sim	Dois laminados inferiores
BS-600-VS8	60	Sim	Dois laminados inferiores e laminados nas laterais

Fonte: Haddad e Almasaeid (2016)

A peça BS-600, rompeu ao cortante e apresentou capacidade de carga residual e rigidez de 146 kN (91%) e 16 MN/m (68%), respectivamente. A viga (BS-600-VS8), rompeu ao fletor com carga de 149 kN (93%) e rigidez de 16 MN/m (69%).

A viga aquecida a 600 °C e depois reparada com dois laminados no fundo da estrutura ocorreu falha por cisalhamento devido a deficiência ao cisalhamento, desse modo, a fim de observar o comportamento à flexão, uma viga foi reforçada com laminados de NSM CFRP envolvendo as laterais da estrutura, além do reforço no intradorso. Dessa maneira, após o aquecimento da viga com essa nova configuração de reforço, ocorreu ruptura à flexão, separação do concreto e descolamento dos laminados de CFRP. Modo de ruptura das vigas após reforço nas laterais, segundo Figura 49.

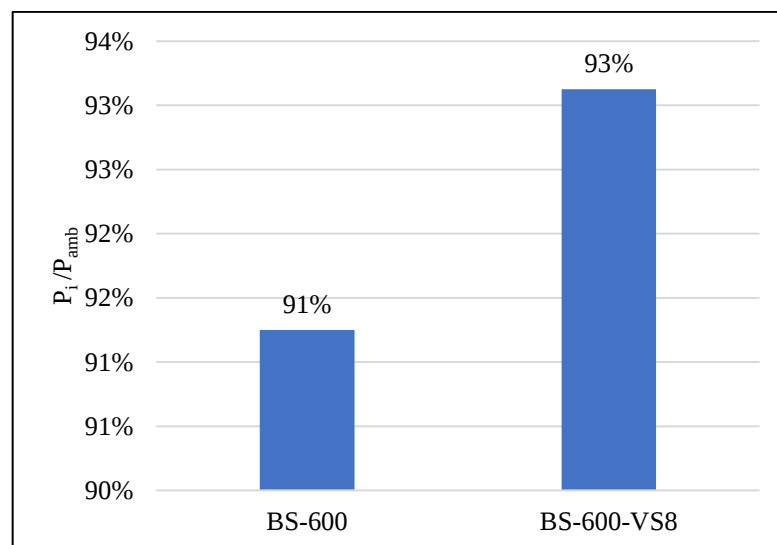
Figura 49 – Modo de falha



Fonte: Adaptado Obaidat et al. (2023)

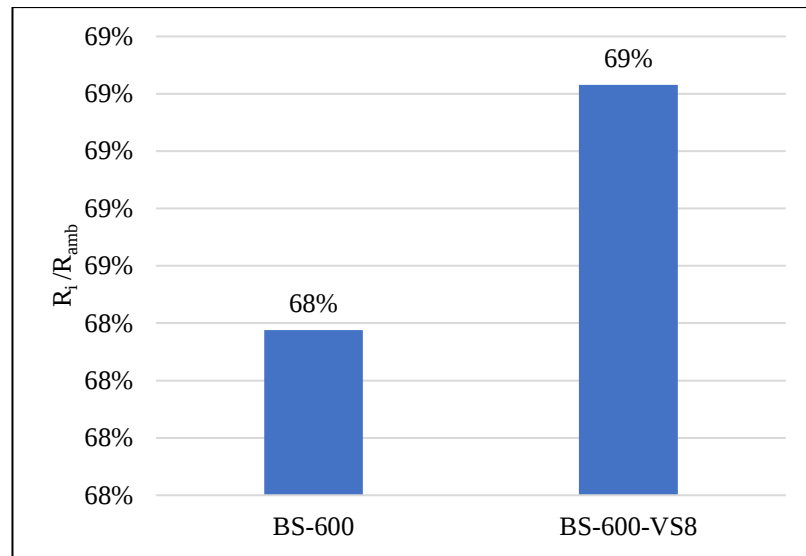
Portanto, através das Figuras 50 e 51 é possível concluir que nenhuma viga conseguiu recuperar a capacidade de carga e rigidez inicial.

Figura 50 – Percentual de recuperação capacidade de carga das vigas



Fonte: A autora (2024)

Figura 51 – Percentual da recuperação capacidade de rigidez das vigas



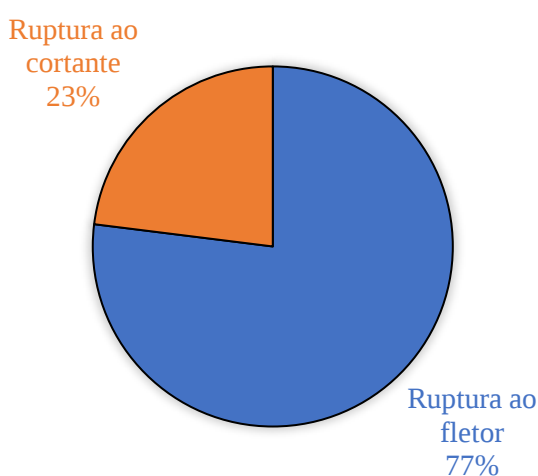
Fonte: A autora (2024)

4 DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS

4.1 CAPACIDADE DE CARGA E RIGIDEZ

Esta revisão sistemática constatou 11 publicações elegíveis. Dessa forma, foram analisados no total 152 de vigas de CA (Figura 52), dentre elas, 117 vigas foram realizadas para compreender sobre o reforço à flexão e 35 ao cortante.

Figura 52 – Distribuição das vigas ensaiadas nos artigos elegíveis conforme o modo de falha



Fonte: A autora (2024)

Os resultados da revisão sistemática são apresentados através da Tabela 14, com os principais parâmetros estudados. A saber da Tabela 14, vigas com seção retangulares, são identificadas com “R”, com b_f (largura) $\times$ h (altura) e vigas em seção T são definidas com “T”, com b (largura) $\times$ h (altura). Os trabalhos com “*”, são trabalhos que aqueceram as vigas de CA, sem obedecer a nenhuma curva de incêndio padrão. Diante disso, e do contido anteriormente, é possível compreender a influência que os principais parâmetros têm no desempenho do reforço com laminados de CFRP em vigas após incêndio

O número de vigas de CA estudadas em cada trabalho é variável. Sendo encontrados estudos com quantidade mínima de oito espécimes de CA e no máximo de 22 amostras. As seções das vigas na maioria dos casos foram com seção retangular, com exceção de um trabalho em seção T (Lenwari et al., 2020). Ademais, em suma, foram localizadas vigas de CA biapoiadas, sendo caracterizadas com comprimentos superiores a 1000 mm e um estudo com viga de CA em balanço (Ashteyat et al., 2020).

O método de ensaio mais utilizado foi ensaio a quatro pontos. Todos os trabalhos que submeteram os espécimes a carga de quatro pontos, analisam o comportamento das vigas reforçadas à flexão. Isso está associado devido ao método de ensaio de carga de quatro pontos trabalhar com flexão pura, onde a região entre as duas cargas aplicadas somente está sendo solicitadas por momento fletor, sem atuação do esforço cortante. Justamente, para os trabalhos que estudam o comportamento dos corpos de prova reforçados ao cisalhamento, optaram pelo ensaio de três pontos, onde são considerados a atuação do momento fletor e do esforço cortante, neste cenário, flexão simples.

O método mais utilizado para inserção dos laminados, nas vigas de CA foi a técnica NSM. Isso se deve porque, a técnica EBR vem se mostrando menos eficiente do que a técnica NSM, devido sua tendência de 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, devido o FRP ser inserido em sulcos pré-cortados da superfície do concreto, o concreto fornece uma camada de proteção, torna-o menos vulnerável aos danos causados pelo aquecimento da peça ou cargas mecânicas, em comparação quando o FRP colado externamente (Haddad e Almomani, 2017), (Haddad e Almasaeid, 2016).

Embora a técnica NSM se destaque da técnica EBR, por meio dos artigos elegíveis, observa-se que quando utilizada a técnica EBR para colagem dos laminados, o desempenho da recuperação foi melhor em relação as vigas reabilitadas utilizando a técnica NSM, pois apesar do dano ao aquecimento ser maior, das vigas aquecidas com uso da técnica EBR, ela ainda sim apresentou melhores resultados de recuperação. No entanto, isso pode ser causado pelo tipo de seção da viga estudada. Onde quando usado a técnica EBR a pesquisa ocorreu em viga de CA de seção T (Lenwari et al., 2020) e o trabalho com a técnica NSM utilizou viga de seção retangular (Haddad e Almomani, 2017).

Para a avaliação dos corpos de CA, a avaliação foi determinada em dois tipos, pelo aquecimento das vigas em diferentes exposições de temperaturas e pelo aquecimento em diferentes tempos de aquecimento. Parte dos estudos elegíveis (45%) apresentaram a elevação das temperaturas das vigas segundo a curva de incêndio padrão. Embora as curvas de incêndios padrão não representem o real comportamento físico de um incêndio em um compartimento, os trabalhos ao se dispor da curva de incêndio padrão especificamente da ISO-834, proporcionaram resultados com maior respaldo de comparações, devido a padronização das condições de aquecimento dos ensaios.

Os demais trabalhos (55%) elegíveis variam a sua taxa de aquecimento, todos apresentam um regime de aquecimento lento quando comparados com o regime de aquecimento da ISO 834. Embora não sigam nenhuma curva de incêndio padrão, os resultados têm mérito para analisar o comportamento de vigas de CA reforçadas com laminados de CFRP, após incêndio. Além disso, os trabalhos estudaram as vigas aquecidas em estado estacionário de temperatura, com exceção do trabalho de Costa et al. (2023), que analisou em estado transiente de temperatura.

Com a finalidade de analisar o comportamento do reforço dos laminados de CFRP à flexão, é averiguada que a taxa de armadura de cisalhamento é superior a taxa de armadura tracionada. Isso decorre, com intuito da peça de CA romper à flexão. De semelhante modo, os trabalhos com objetivo de analisar o comportamento do reforço dos laminados ao cisalhamento, consta-se que a taxa de armadura à flexão é maior do que a taxa de armadura ao cortante, para que a falha do corpo de CA, ocorresse pela ruptura cisalhante. A equação para calcular a taxa de armadura de tracionada é regida pela Equação 3, enquanto a Equação 4 apresenta a taxa de armadura de cisalhamento, consoante a ABNT NBR 6118 (2004).

$$\rho_l = \frac{A_s}{b \times h} \quad (3)$$

Onde:

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

$$\rho_t = \frac{A_{sw}}{b \times s} \quad (4)$$

Onde:

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

Os trabalhos apresentaram especificações dos laminados. Evidenciando a espessura do laminado, altura (técnica NSM) e largura (técnica EBR). No entanto, em certos estudos faltaram dados da altura ou largura. Para maioria dos trabalhos com dados suficientes, foi possível calcular a taxa de contribuição de laminado de CFRP, utilizado nas vigas. A taxa de reforço à flexão foi calculada através da Equação 5, derivada da Equação 3, devido o reforço do laminado está posicionado semelhante a armadura tracionada da viga de CA. A taxa de reforço ao cisalhamento foi calculada por meio da Equação 6 (Costa et al., 2023). A taxa de reforço

utilizado influência os resultados das propriedades mecânicas da peça aquecidas e posteriormente reforçada com o laminado de CFRP.

$$Rf = \frac{A}{A_g} \quad (5)$$

Onde:

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

$$Rc = \frac{A_f}{(b \times s_f \times \sin \theta_f)} \quad (6)$$

Onde:

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

Foi possível observar por meio dos estudos elegíveis, que com o aumento da taxa de reforço em vigas de CA pós incêndio, acontece aumento da capacidade de carga, e para boa parte das vigas, também o aumento da rigidez das peças (Ashteyat et al., 2020), (Costa et al., 2023), (Haddad e Almasaeid, 2016).

Em grande maioria os estudos apresentados são de espécimes aquecidos e depois de reforçados com à flexão com laminados de CFRP. Para os espécimes aquecidos que atingiram uma mesma temperatura (700 °C), e depois reforçadas com laminados de CFRP, percebe-se que amostras reparadas com adesivo epóxi constaram maior recuperação da capacidade de carga e rigidez, do que quando reparadas com cola a base cimentícia. Além disso, quando reparadas com isolamentos e reforçadas, apresentaram maior recuperação em comparação com vigas sem isolamento (Jadooe et al., 2017a, Jadooe et al., 2018a,b).

Diante das vigas analisadas, reforçadas à flexão, pós incêndio e resfriadas, as amostras apresentam em maioria a recuperação da capacidade de carga e rigidez, para as diferentes exposições de aquecimento. A recuperação depende principalmente do dano ao aquecimento e configuração do reforço. O restauro para maior dano de aquecimento de até 900 °C (Lenwari et al., 2020), utilizando o método EBR-CFRP para reforço, que este obteve restauro completo da capacidade de carga (119%) e rigidez, mas se trata de viga em seção T. Para peça de seção retangular, quando utilizou a técnica NSM com adesivo epóxi e isolamento, a viga recuperou

até o dano de 800°C, com 115% da capacidade de carga (Jadooe, 2018a), e também recuperou a rigidez inicial.

Quando se trata de reforço ao cisalhamento de vigas pós incêndio com laminados de NSM-CFRP, os estudos são mais escassos (Haddad e Almasaeid et al., 2016), (Costa et al., 2023). Em ambos os casos a rigidez não foi recuperada após o dano ao calor e reforçadas CFRP. No que concerne a capacidade de carga última depois das vigas danificadas e reparadas com os laminados, houve restauração até 500 °C, analisado a viga no estado estacionário de temperatura (Haddad e Almasaeid et al., 2016), e restauraram completamente para estado transiente de temperatura, forno/viga atingido mais de 1000°C (Costa et al., 2023).

O reforço à flexão após incêndio é mais eficiente, em comparação ao reforço ao cisalhamento, ou seja, ele consegue recuperar a capacidade resistente da peça, para vigas pós exposição de temperatura de até 800 °C, resfriadas e então reforçadas com laminados de CFRP (Jaddoe 2018a,b), enquanto quando reforçado ao cisalhamento a capacidade de carga inicial é recuperada até 500°C (Haddad e Almasaeid et al., 2016), considerando aquecimento do forno no estado estacionário de temperatura, e comparando com a recuperação em relação à viga ambiente.

Tabela 14 – Parâmetros das amostras ensaiadas

Autor	n° citações	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 (%)
Jadooe et al. (2017a)	39	8	R:140 × 260	2700	4 pontos	NSM	Flexão	600 e 700°C	ISO 834	0,90	0,62	20 × N.I.	N.I.
Haddad e Almomani (2017)	35	20	R:150 × 250	1400	4 pontos	NSM	Flexão	600°C	*	0,89	0,60	15 × 2,5	0,10
Haddad e Almasaeid (2016)	22	22	R:150 × 250	1400	3 pontos	NSM	Cisalhamento	300, 500 e 600°C	*	0,13	1,68	15 × 2,5	0,25
Jadooe et al. (2018a)	18	12	R:140 × 260	2700	4 pontos	NSM	Flexão	700 e 800 °C	ISO 834	0,90	0,62	20 × N.I.	N.I.
Ashteyat et al. (2020)	13	12	R:150 × 150	750	2 pontos	NSM	Flexão	400 e 500°C	*	1,34	1,01	15 × 2,5	0,17
Jadooe et al. (2018b)	12	12	R:140 × 260	2700	4 pontos	NSM	Flexão	700 e 800 °C	ISO 834	0,90	0,62	20 × N.I.	N.I.
Lenwari et al. (2020)	9	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
Haddad e Yaghmour (2020)	7	11	R:150 × 250	1400	4 pontos	NSM	Flexão	400 e 500 °C	*	1,31	0,60	15 × 2,5	0,10
Barham et al. (2022)	2	16	R:100 × 150	1150	4 pontos	NSM	Flexão	400°C	*	2,01	1,05	15 × 2,5	0,25
Costa et al. (2023)	0	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
Obaidat et al. (2023)	0	11	R:150 × 200	1150	4 pontos	NSM	Flexão	600°C	*	0,89	0,52	2,5 × N.I.	N.I.

4.2 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DAS VIGAS

Através dos estudos é possível determinar uma previsão analítica da resistência de vigas de concreto armado após incêndio, e também a resistência de vigas de concreto aquecidas e depois reforçada com laminados de CFRP.

4.2.1 Resistência após incêndio de vigas de concreto armado

Resistência residual de vigas de concreto armado após incêndio para o momento fletor e o cisalhamento de vigas em concreto armado (Costa, 2022).

O momento fletor das vigas aquecidas calcula-se por meio da profundidade da isoterma de 500 °C (d_{500}), largura da seção de concreto reduzida (b_{fi}), e da altura útil (d_{fi}). Por meio do equilíbrio de forças e de momentos na seção transversal, encontram-se as parcelas resistentes referentes ao concreto e ao aço, semelhante recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014). Os coeficientes $\alpha_{c\theta}$, γ_c e γ_s foram adotados iguais a 1 e λ_θ igual a 0,8.

Para a capacidade ao cisalhamento, tem-se:

a) Vigas sem estribos ($V_r^{ana}=V_{c\theta}$)

Para $\xi \leq 2$:

$$V_{c\theta} = \frac{V_{Rd2}}{\xi} \quad (7)$$

Para $2 < \xi \leq 3,5$:

$$V_{c\theta} = V_{c0} \cdot \xi^{a/L} \quad (8)$$

Para $\xi > 3,5$:

$$V_{c\theta} = V_{c0} \quad (9)$$

Onde: $V_{c0} = 0,6 \cdot \frac{f_{ct}}{\gamma_c} \cdot b_{fi} \cdot d_{500}$ (10)

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_{fi} \cdot d_{500} \quad (11)$$

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (12)$$

Onde:

V_r^{ana} = força cortante residual; V_{Rd2} = força cortante relativa à ruína da biela comprimida de concreto; V_{c0} = parcela da força cortante do concreto resistida por mecanismos complementares.

a) Vigas com estribos ($V_r^{ana} = V_{R0}$)

Para $\xi \leq 2$:

$$V_{R0} = \frac{V_{Rd2}}{\xi^{1+a/L}} + \frac{V_{s0}}{\xi} \quad (13)$$

Para $2 < \xi \leq 3,5$:

$$V_{R0} = \frac{V_{c0}}{\xi^{1-a/L}} + V_{s0} \quad (14)$$

Para $\xi > 3,5$:

$$V_{R0} = V_{c0} + V_{s0} \quad (15)$$

$$V_{s0} = \frac{A_{sw}}{s_{sw}} \cdot k_{sr} \cdot \frac{f_y}{\gamma_s} \cdot d_{500} \quad (16)$$

onde:

V_{s0} = parcela do cortante resistida pelos estribos após incêndio. Os coeficientes γ_c e γ_s iguais a 1.

4.2.2 Reforço ao cisalhamento NSM laminados CFRP

Para viga aquecida e depois reforçada ao cisalhamento NSM CFRP com laminados inseridos no cobrimento do concreto e perpendiculares à viga, carregados a carga de três pontos, a capacidade de carga nominal de cisalhamento é calculada conforme a Equação 17 (Haddad e Almasaeid, 2016).

$$V_n = \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} b_w d + \frac{A_s f_y d}{S_s} + \beta \frac{A_f f_{yf} d}{S_f} \quad (17)$$

Onde:

f'_c = Resistência à compressão especificada do concreto, b_w = largura da alma da viga, d = distância da compressão extrema da fibra ao centroide da armadura de tração longitudinal, A_f = área de laminados de CFRP em cisalhamento em ambos os lados da viga, f_y = resistência tração ao aço, A_s = área do aço cisalhado, S_s = espaçamento dos estribos de aço, β = fator de eficiência (Tabela 15), f_{yf} = Resistência ao escoamento à tração dos compósitos CFRP, S_f = espaçamento da armadura de cisalhamento.

Tabela 15 –Fator de eficiência de vigas pós-aquecidas e depois reparadas com NSM CFRP em diferentes espaçamentos.

T (°C)	23	300	500	600			
Spacing (mm)	200	200	100	200	100	150	200
$\beta(\%)$	26	25	14	18	8	13	12

Fonte: Haddad e Almasaeid (2016)

4.2.3 Reforço à flexão NSM CFRP laminados na parte inferior da viga

Para viga aquecida e posteriormente reforçada à flexão com laminados NSM CFRP na parte inferior da viga, carregados a carga de quatro pontos, a capacidade de carga última é calculada por meio das equações 18-25, e finalmente formulada na Equação 25 (Haddad e Almomani, 2017):

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_c = \frac{c}{d_f - c} \epsilon_f \\ \epsilon_s = \frac{d - c}{d_f - c} \epsilon_f \\ \epsilon'_s = \frac{c - c'}{d_f - c} \epsilon_f \end{array} \right\} \quad (18)$$

Onde:

ϵ_c = deformação no concreto, ϵ_s = tensão no aço, ϵ'_s = compressão no aço, ϵ_f = deformação de tração nos laminados de NSM CFRP, d_f = distância entre os laminados de NSM CFRP e a superfície do concreto, c = profundidade do eixo neutro da superfície superior das vigas, e c' = distancia entre o centro do aço comprimido e a superfície superior do concreto.

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \left(\frac{2}{3} \right) * f'_c * \left(2 * \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right) \right) bc \quad 0 < \epsilon_c < \epsilon_0 \\ C = \left(\frac{2}{3} \right) * f'_c * \left(1 - \left(\frac{0,15}{\epsilon_u - \epsilon_0} (\epsilon_c - \epsilon_0) \right) \right) bc \quad \epsilon_0 < \epsilon_c < \epsilon_u \end{array} \right. \quad (19)$$

Onde:

f'_c = resistência à compressão do concreto, b = largura da viga, e ϵ_u e ϵ_0 = forças de compressão do concreto para o concreto danificado pelo aquecimento.

$$\begin{cases} C'_s = A'_s E'_s \epsilon'_s & E'_s \epsilon'_s \leq f_y \\ T_s = A_s E_s \epsilon_s & E_s \epsilon_s \geq f_y \\ T_f = A_f E_f \epsilon_f \end{cases} \quad (20)$$

Onde:

C'_s = força de compressão no aço superior, T_s = força de tração no de aço inferior, T_s = força de tração nos laminados de NSM CFRP, A'_s = área da seção do aço superior, A_s = área da seção do aço inferior, A_f = área da seção transversal dos laminados de NSM CFRP, compressão do concreto, E'_s = módulo de elasticidade do reforço de aço superior, E_s = módulo de elasticidade do reforço de aço inferior, e E_f = módulo de elasticidade dos laminados de CFRP NSM.

$$\sum F = \sum (T - C) = 0 \quad (21)$$

Onde:

C = força de compressão que atua na seção transversal da viga e T = força de tração que atua na seção transversal da viga.

$$M = (C \text{ or } T)(d_t - d_c) \quad (22)$$

Onde:

M = Capacidade de momento das vigas, d_t e d_c , são calculadas seguindo as equações 23 e 24.

$$d_c = \frac{C_c \left(\frac{3c}{8} \right) + C'_c (c')}{C_c + C'_c} \quad (23)$$

$$d_t = \frac{T_s(d) + T_f(d_s)}{C_c + C'_c} \quad (24)$$

Então a capacidade de carga é regida por:

$$P_u = \frac{2M}{x} \quad (25)$$

Onde:

P_u = Capacidade de carga final e x = distância de qualquer suporte ao ponto de carga mais próximo.

4.2.4 Reforço à flexão SNSM CFRP laminados nas laterais da viga

Para viga aquecida e depois reforçada à flexão com laminados montadas na superfície lateral SNSM CFRP, carregadas a carga de quatro pontos, a capacidade de carga última é calculada por meio das equações 26-33, a e finalmente formulada na Equação 33 (Haddad e Almomani, 2020):

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_c = \frac{c}{d_f - c} \epsilon_f \\ \epsilon_c = \frac{d - c}{d_f - c} \epsilon_f \\ \epsilon'_s = \frac{c - c'}{d_f - c} \epsilon_f \end{array} \right\} \quad (26)$$

Onde:

ϵ_c = deformação no concreto, ϵ_s = tensão no aço, ϵ'_s = compressão no aço, d_f = distância entre os laminados de NSM CFRP e a superfície do concreto, c = profundidade do eixo neutro da superfície superior das vigas, e c' = distancia entre o centro do aço comprimido e a superfície superior do concreto.

$$\left\{ \begin{array}{l} f_c = f'_{ct} * \left(2 * \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}} \right)^2 \right) \quad 0 < \epsilon_c < \epsilon_{cu} \\ f_c = f'_{ct} \left(1 - \left(\frac{\epsilon_c - \epsilon_{cu}}{\epsilon_{cf} - \epsilon_{cu}} \right) \right) \quad \epsilon_{cu} < \epsilon_c < \epsilon_{cf} \end{array} \right. \quad (27)$$

Onde:

f'_c = resistência à compressão do concreto e b = largura da viga. ϵ_{cu} e ϵ_{cf} = forças de compressão do concreto para o concreto danificado pelo aquecimento.

$$\left\{ \begin{array}{l} C_c = \frac{2}{3} f_c b c \\ C'_s = A'_s E_s \epsilon'_s \quad E_s \epsilon'_s < f_y \\ C'_s = A'_s f_y \quad E_s \epsilon'_s \geq f_y \end{array} \right. \quad (28)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_s = A_s E_s \epsilon_s \quad E_s \epsilon_s < f_y \\ T_s = A_s f_y \quad E_s \epsilon_s \geq f_y \\ T_f = A_f E_f \epsilon_f \end{array} \right. \quad (29)$$

$$M = (C \text{ or } T)(d_t - d_c) \quad (30)$$

$$d_c = \frac{C_c \left(\frac{3c}{8} \right) + C_s d}{C_c + C_s} \quad (31)$$

$$d_t = \frac{T_s(d) + T_f(d_f)}{T_s + T_f} \quad (32)$$

Então a capacidade de carga é regida por:

$$P_u = \frac{2M}{l} \quad (33)$$

Onde:

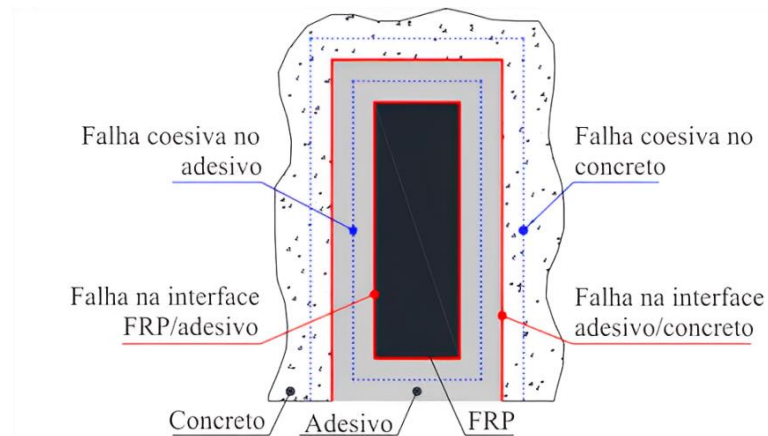
P_u = Capacidade de carga final e l = distância de qualquer suporte ao ponto de carga mais próximo.

4.3 MODO DE FALHA

Os laminados CFRP trabalham de forma a transferir parte da capacidade de carga da estrutura original para o reforço (CFRP) de alta resistência, o desempenho da transferência de carga está relacionado com eficiência da colagem entre a interface do laminado CFRP-adesivo-concreto (Machado, 2010). Desse modo, os estudos apresentam vigas de CA reforçadas com CFRP evidenciando modo de falha relacionados a descolagem da interface, mas também não somente aos materiais. Sendo assim, pode-se observar certos tipos de modo de falha, como na região CFRP/concreto, ruptura do CFRP, falha por compressão do concreto, falha interface CFRP/adesivo.

A depender do tipo de técnica e configuração de reforço e do dano da temperatura, influencia no modo de falha das vigas aquecidas e depois reabilitadas. De modo geral, para a maioria dos espécimes analisados pós incêndio e reforço de CFRP, a falha ocorreu pelo descolamento do cobrimento do concreto e a deficiência do sistema EBR/NSM CFRP. Os modos de falha foram destrinchados por Coelho et al. (2015) e podem ser observados na Figura 54.

Figura 53 – Modos de falha por descolagem na ligação



Fonte: Adaptado de Coelho *et al.* (2015)

Al-Saadi *et al.* (2019) descrevem os principais fatores que podem influenciar no modo de ruptura, são:

- Ruptura do FRP: Quando há um confinamento eficiente do FRP e um comprimento de colagem adequado.
- Falha nas interfaces concreto/adesivo e adesivo/FRP: Comprimentos de colagem insuficientes ou adesivo de baixa resistência à tração.
- Falha coesiva no concreto: Concreto de menores resistência e adesivos com alta resistência à tração
- Falha coesiva no adesivo: Pequena profundidade na ranhura para inserção do laminado, levando a fissuração no adesivo sem fissuras no concreto.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS

5.1 CONCLUSÃO

Diante dos artigos elegíveis da revisão sistemática, as seguintes conclusões podem ser afirmadas acerca do estudo de vigas de CA aquecidas, resfriadas e depois reforçadas com laminados de CFRP:

- O reforço foi eficiente aumentando a capacidade de carga da viga danificada pelo incêndio;
- Na maioria dos casos foi possível restaurar a capacidade de carga inicial da viga ou até mesmo aumentar em até 74% este valor inicial;
- Na maioria das vigas reforçadas à flexão foi restaurada a rigidez, mas quando reforçada ao cisalhamento não foi recuperada;
- 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;
- Quanto maior taxa de reforço maior a capacidade de carga e rigidez;
- Os parâmetros que mais influenciaram o desempenho das vigas de CA, foram: nível de temperatura de aquecimento, a técnica de reforço EBR/NSM e a taxa de reforço;
- O adesivo epóxi e o adesivo cimentício apresentaram resultados similares, para a recuperação das vigas;
- O modo de falha característico das vigas foi por meio *peeling-off*. Também ocorreu com combinações de falha: falha nas interfaces concreto/adesivo, falha coesiva no adesivo ou ruptura do CFRP.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Devido às limitações dos parâmetros utilizados para avaliar vigas de concreto armado, resfriadas e depois reforçadas com laminados de fibra de carbono, são deixadas sugestões para pesquisas futuras.

Trabalhos que estudem reforços à flexão considerando: temperatura no estado transiente, reforços nas laterais das vigas e com diferentes taxas de reforço dos laminados de CFRP.

Bem como, análises para o reforço com laminados de CFRP ao cisalhamento, tanto no estado estacionário como transiente de temperatura, a fim de fornecer mais dados experimentais para literatura técnica, considerar diferente taxas de reforço, combinação da técnica EBR e NSM, utilizando os laminados de CFRP.

REFERÊNCIAS

- AL-SAADI, NTK; MOHAMMED A.; AL-MAHAIDI R.; SANJAYAN J. A state-of-the-art review: Near-surface mounted FRP composites for reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials* 209 (2019) 748–769. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.121>
- ACI Committee 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, ACI 440.2R-17. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute. 2017.
- ACI Committee 562. Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures, ACI 562-19. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute. 2019.
- ASHTYAT, A. M.; HADDAD, R.; OBAIDAT, Y. T. Repair of heat-damaged SCC cantilever beams using SNSM CFRP strips. In: *Structures*. Elsevier, 2020. p. 151-162., <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.01.005>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto Procedimento. 2004.
- BARHAM, W.; OBAIDAT, Y.; ALKHATATBEH, H. 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. 10.34910/MCE.111.6.
- BARRIS, C. et al. Flexural behaviour of FRP reinforced concrete beams strengthened with NSM CFRP strips. *Composite Structures*, v. 241, p. 112059, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112059>.
- BUCHANAN, A. H.; ABU, A. K. Structural design for fire safety. John Wiley & Sons, 2017.
- CAN/CSA-S806-02. Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers. 2017
- CNR-DT 200 R1. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Roma (2013)
- COELHO, M.R.F.; SENA-CRUZ, J.M.; NEVES, L.A.C. “Review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 93, 1157-1169, September, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.010>.
- COELHO, T. A. P. Avaliação da confiabilidade de seções de vigas de concreto armado em situação de incêndio. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. 103 f.

CONCRETO&ALVENARIA. Disponível em: <<https://blogsci.com.br/protecao-de-concreto-e-alvenaria/concretoalvenaria/>>. Acesso em: 10 mar. 2024.

COSTA, C. N. Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia, São Paulo, 2008.

COSTA, L. M. 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, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000200002>.

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. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116175>.

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. doi <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01941-9>.

CTIF, Center of Fire Statistics (International Association of Fire and Rescue Services). World Fire Statistics, Report nº28, 2023. World Fire Statistics, Report nº 23. Disponível em: https://www.ctif.org/sites/default/files/2023-06/CTIF_Report28-ESG.pdf. Acessado em: 16 jan.2024.

DEMIR, U.; GREEN, M. F.; ILKI, A. Postfire seismic performance of reinforced precast concrete columns. PCI Journal, v. 65, n. 6, 2020. <https://doi.org/10.15554/pci.65.6-01>.

FIB. Externally applied FRP reinforcement for concrete structures. Technical report (229 pages, ISBN 978-2-88394-131-1, July (2019). Bulletin 90

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, 2019. 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.05.S059.

EMARA, M. et al. Bond behavior of NSM CFRP laminates in concrete under sustained loading. Construction and Building Materials, v. 177, p. 237-246, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.050>.

ENGINEERINGVILLAGE. Disponível em: <<https://www.engineeringvillage.com/search/quick.url>>. Acesso em: 11 mar. 2024.

ESFAHANI, M. et al. Experimental investigation of residual flexural capacity of damaged reinforced concrete beams exposed to elevated temperatures. Engineering Structures, v. 240, p. 112388, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112388>.

FIB, F. I. D. B. Bulletin 38 – Fire design of concrete structures. Lausanne, Suíça: EPFL, 2007.

FLETCHER, I. A. et al. The behaviour of concrete structures in fire. Thermal Science 11 (2), p. 33-57, 2007. 10.2298/TSCI0702037F

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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.152>.

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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.211>.

HADDAD, R. H.; YAGHMOUR, E. M. Retrofitting Heat-Damaged concrete beams using different profiles of side NSM CFRP strips. In: *Structures*. Elsevier, 2020. p. 2232-2243. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.027>

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. <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1852777>.

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. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1432803>.

INTERNATIONAL STANDARD. ISO 834:2014 - Fire-resistance tests – Elements of building construction. Part 1: General requirements. International Organization of Standardization, Genève, 2014.

INSTITUTO SPRINKLER BRASIL.(ORG). Estatísticas de incêndios. Disponível em:

<<http://www.sprinklerbrasil.org.br/>>. Acesso em: 04 fev. 2024.

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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.047>.

JADOOE, A.; AL-MAHAIDI, R.; ABDOUKA, K. Behaviour of heat-damaged partially-insulated RC beams using NSM systems. *Construction and Building Materials*, v. 180, p. 211-228, 2018b. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.279>.

JADOOE, A.; AL-MAHAIDI, R.; ABDOUKA, K. 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000812](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000812).

JADOOE, A.; AL-MAHAIDI, R.; ABDOUKA, 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.202>.

JADOOE, A.; AL-MAHAIDI, R.; ABDOUKA, K. Modelling of NSM CFRP strips embedded in concrete after exposure to elevated temperature using epoxy adhesives. *Construction and*

Building Materials, v. 148, pp. 155–166, 2017c. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.06.017>.

JADOOE, A.; AL-MAHAIDI, R.; ABDOUKA, 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.020>.

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., 10.1007/s40999-018-0387-8.

KHSHAIN, N. T.; AL-MAHAIDI, R.; ABDOUKA, 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. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.060>.

KIM, Y. J. State of the practice of FRP composites in highway bridges. Engineering Structures, v. 179, p. 1-8, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.067>.

LANDI, F. R. Ação do incêndio sobre as estruturas de concreto armado. São Paulo: EPUSP, 1986. (Boletim Técnico BT/PCC-86/001).

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. 10.14359/51728064.

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. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105584>.

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, 2023. p. 1084-1095. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.06.069>.

MACHADO, A. P. Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono. São Paulo: Better, v. 24, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014, 782 p.

MOHAMMED, A.; AL-SAADI, 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.238>.

MURAD, Y.; ABU-ALHAJ, T. Flexural strengthening and repairing of heat damaged RC beams using continuous near-surface mounted CFRP ropes. In: Structures. Elsevier, 2021. p. 451-462. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.079>.

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. <https://doi.org/10.1061/JPCFEV.CFENG-4297>.

OBAIDAT, Y. T.; BARHAM, W.; OBEIDAT, R. B. Repair of thermally shocked reinforced concrete beams using near-surface mounted–Carbon fiber reinforced polymers ropes and strips. *Construction and Building Materials*, v. 366, p. 130201, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130201>.

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. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.

PORTAL PERIODICOS CAPES. Disponível em: <<https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php?>>. Acesso em: 11 mar. 2024.

RASHID, R.; OEHLERS, D. J.; SERACINO, R. IC debonding 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:2\(160\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:2(160)).

SCIENCEDIRECT. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 11 mar. 2024

SCOPUS. Disponível em: <<https://www.scopus.com/home.uri>>. Acesso em: 11 mar. 2024b.

SHANAA, A. Rayyan – intelligent systematic review. Disponível em: <<https://www.rayyan.ai/>>. Acesso em: 11 mar. 2024.

SIA166. Klebebewehrungen. (Externally bonded reinforcement). Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA. Swiss, 2004

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. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104480>.

WANG, X.; CHENG, L. Bond characteristics and modeling of near-surface mounted CFRP in concrete. *Composite Structures*, v. 255, p. 113011, 2021., <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113011>.

WEBOFSCIENCE. Disponível em: < <https://www.webofscience.com/wos/author/search/>>. Acesso em: 11 mar. 2024

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. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.089>.