

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Hugo Guilherme Graef Ludwig

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE REVESTIMENTOS DE PROTEÇÃO AO FOGO
PARA REFORÇOS ESTRUTURAIS COM FIBRAS DE CARBONO**

Porto Alegre

2020

HUGO GUILHERME GRAEF LUDWIG

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE REVESTIMENTOS DE PROTEÇÃO AO FOGO
PARA REFORÇOS ESTRUTURAIS COM FIBRAS DE CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Graduação do curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Ângela Gaio Graeff

Porto Alegre

2020

HUGO GUILHERME GRAEF LUDWIG

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE REVESTIMENTOS DE PROTEÇÃO AO FOGO
PARA REFORÇOS ESTRUTURAIS COM FIBRAS DE CARBONO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado e adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pela Professora Orientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, novembro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ângela Gaio Graeff (UFRGS)

PhD pela Universidade de Sheffield

Orientadora

Profa. Mônica Regina Garcez (UFRGS)

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng.^a Helena Szortika Quadros (UFRGS)

Eng.^a pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, Luiz e Inêz, por todo o apoio
e por sempre acreditaram em mim, mesmo quando eu não
acreditava.

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas foram importantes durante toda a minha jornada de graduação; portanto, farei aqui um breve, mas verdadeiro agradecimento a elas.

A minha orientadora, Profª Ângela Graeff, pela confiança, interesse e disponibilidade em me auxiliar na construção desse trabalho, assim como aos técnicos do LEME pelo auxílio nas atividades práticas desenvolvidas.

Aos amigos que conquistei dentro e fora do curso por serem muito mais que amigos e companheiros, mas minha família em Porto Alegre. Muito obrigado pelo apoio em noites de estudo, trabalhos em grupo e atividades da faculdade, mas principalmente pelo ombro amigo quando precisei de um amparo e pelos momentos de diversão e completa felicidade que vivemos juntos. Mesmo seguindo caminhos opostos espero que continuemos sempre juntos.

As minhas irmãs, Claudinara e Katieli, pelo apoio à oportunidade que tive de estudar em uma universidade pública e por me proporcionarem o maior incentivo e razão para nunca desistir e correr atrás dos meus objetivos: os meus sobrinhos.

Aos meus pais, Luiz e Inêz, pelos anos que deixaram de descansar para me manter em outra cidade e pela confiança a mim depositada na esperança de que eu conquiste um futuro promissor. Um dia conseguirei recompensar todo esse amor e dedicação. Muito obrigado, por tudo.

RESUMO

Com o objetivo de aumentar a resistência das estruturas de concreto, a técnica de reforço com PFRC (Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono) vem sendo cada vez mais utilizada como alternativa de recuperação estrutural. Entretanto, um dos fatores que reduzem a capacidade resistente do sistema é a ação do fogo, uma vez que a resina epóxi utilizada para a aderência do tecido de fibra de carbono ao substrato do concreto é altamente vulnerável ao efeito de elevadas temperaturas. O epóxi apresenta uma significativa redução de resistência e módulo de elasticidade quando aquecido à temperatura de transição vítrea, com valores entre 60 °C e 80 °C aproximadamente, facilmente ultrapassados em situação de incêndio. A presente pesquisa investiga experimentalmente a utilização de três métodos de proteção passiva, manta de lã de rocha, manta de fibra cerâmica e gesso acartonado aplicados sobre o reforço com o intuito de minimizar os danos gerados pela ação de elevadas temperaturas na resina epóxi. Os resultados da análise indicam que o adesivo epóxi apresenta um processo de volatilização quando exposto à temperatura definida de 500 °C, comprometendo a eficácia da técnica de reforço; no entanto, a aplicação dos revestimentos mostrou-se importante como forma de retardar a degradação do elemento compósito, verificando-se que a perda na capacidade de carga do reforço foi menor para os modelos que apresentavam proteção passiva, podendo garantir a segurança estrutural.

Palavras-chave: Polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC), Proteção passiva, Resina epóxi, Resistência ao fogo.

ABSTRACT

In order to increase the strength of concrete structures, the reinforcement technique with CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) has been increasingly used as an alternative for structural recovery. However, one of the factors that differentiate the resistant capacity of the system is the fire action, since the epoxy resin used for the adhesion of the carbon fiber fabric to the concrete substrate is highly vulnerable to the high temperature effect. The epoxy has a reduction in resistance and modulus of elasticity when heated to the glass transition temperature, with values between 60 °C and 80 °C approximately, easily overcome in a fire situation. The present research investigates the use of three methods of passive protection on the reinforcement: rock wool blanket, ceramic fiber blanket and plasterboard, in order to minimize the damage generated by the action of high temperatures in the epoxy resin. The results of the analysis indicate that the epoxy adhesive presents a process of volatilization when exposed to the defined temperature of 500 °C, compromising the effectiveness of the reinforcement technique; however, an application of the coatings proved to be important as a way of delaying the degradation of the composite element, verifying that the loss in the load capacity of the reinforcement was less for the models that presented passive protection, being able to guarantee the structural security.

Keywords: Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP), Passive protection, Epoxy resin, Fire resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelos revestidos com argamassa de revestimento e gesso.....	4
Figura 2 – Variação da capacidade de carga com a temperatura e revestimento.....	4
Figura 3 – (a) Corpos de prova reforçados com CFRP (b) Revestimento com tinta intumescente (c) Revestimento com argamassa projetada.....	5
Figura 4 – Dimensões e detalhamento do corpo de prova e reforço.....	6
Figura 5 – Curva modelo de incêndio padrão adaptada da ISO 834.....	7
Figura 6 – Moldagem dos corpos de prova da primeira concretagem.....	9
Figura 7 – Passos da aplicação do reforço (a) Preparação da superfície (b) Aplicação da resina epóxi (c) Colagem da fibra de carbono.....	10
Figura 8 – Processo de aplicação dos revestimentos (a) Gesso acartonado (b) Manta de lã de rocha (c) Manta de fibra cerâmica.....	11
Figura 9 – Gráfico do tempo de aquecimento do forno.....	11
Figura 10 – Esquema de aquisição de dados de temperatura.....	12
Figura 11 – Corpo de prova posicionado no forno (gesso acartonado)	12
Figura 12 – (a) Esquema de aplicação de cargas (b) Ensaio à flexão da viga testemunho reforçada	13
Figura 13 – Cargas de ruptura dos corpos de prova com e sem CFRP.....	15
Figura 14 – Aspecto do corpo de prova reforçado exposto a elevadas temperaturas.....	15
Figura 15 – Aspecto do corpo de prova pós exposição à situação de incêndio (a) Manta de lã de rocha (b) Manta de fibra cerâmica (c) Gesso acartonado.....	16
Figura 16 – Temperaturas registradas durante os ensaios.....	17
Figura 17 – Gráfico comparativo da carga de ruptura dos corpos de prova estudados....	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Corpos de prova moldados e condições de ensaio à flexão.....	8
Tabela 2 – Resistência à compressão do concreto.....	14
Tabela 3 – Cargas de ruptura à flexão dos corpos de prova revestidos	18

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	2
2 PESQUISAS DE DESEMPENHO DE PROTEÇÃO PASSIVA EM ELEMENTOS DE CONCRETO REFORÇADOS COM PRFC.....	3
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	5
3.1 ASPECTOS GERAIS	6
3.2 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	7
3.3 APLICAÇÃO DO REFORÇO.....	9
3.4 APLICAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO AO FOGO.....	10
3.5 EXPOSIÇÃO A ELEVADAS TEMPERATURAS	11
3.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO	13
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	14
4.1 CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO	14
4.2 EFEITO DA TEMPERATURA NO REFORÇO COM FIBRA DE CARBONO.....	14
4.3 ANÁLISE VISUAL DOS CORPOS DE PROVA.....	16
4.4 EFEITO DA TEMPERATURA NOS CORPOS DE PROVA REVESTIDOS.....	17
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	18

Análise experimental de revestimentos de proteção ao fogo para reforços estruturais com fibras de carbono

Resumo: Com o objetivo de aumentar a resistência das estruturas de concreto, a técnica de reforço com PFRC (Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono) vem sendo cada vez mais utilizada como alternativa de recuperação estrutural. Entretanto, um dos fatores que reduzem a capacidade resistente do sistema é a ação do fogo, uma vez que a resina epóxi utilizada para a aderência do tecido de fibra de carbono ao substrato do concreto é altamente vulnerável ao efeito de elevadas temperaturas. O epóxi apresenta uma significativa redução de resistência e módulo de elasticidade quando aquecido à temperatura de transição vítrea, com valores entre 60 °C e 80 °C aproximadamente, facilmente ultrapassados em situação de incêndio. A presente pesquisa investiga experimentalmente a utilização de três métodos de proteção passiva, manta de lã de rocha, manta de fibra cerâmica e gesso acartonado aplicados sobre o reforço com o intuito de minimizar os danos gerados pela ação de elevadas temperaturas na resina epóxi. Os resultados da análise indicam que o adesivo epóxi apresenta um processo de volatilização quando exposto à temperatura definida de 500°C, comprometendo a eficácia da técnica de reforço; no entanto, a aplicação dos revestimentos mostrou-se importante como forma de retardar a degradação do elemento compósito, verificando-se que a perda na capacidade de carga do reforço foi menor para os modelos que apresentavam proteção passiva, podendo garantir a segurança estrutural.

Palavras-chave: Polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC), Proteção passiva, Resina epóxi, Resistência ao fogo.

1 INTRODUÇÃO

O reforço de estruturas de concreto armado através da colagem de materiais compósitos de polímeros reforçados com fibras de carbono tem se destacado, a partir dos anos 1990, no emprego em soluções de engenharia com o objetivo de prolongar a vida útil das estruturas (MARQUES, 2018). Segundo Souza e Ripper (1998), a necessidade de reforços em estruturas se deve a fatores como correção de falhas de projeto ou de execução, aumento e reestruturação da capacidade portante da estrutura diminuída em virtude de desgaste natural, deterioração ou acidentes como choques e incêndios. Neste contexto, o compósito de fibras de carbono apresenta um conjunto de propriedades favoráveis e virtudes em relação às outras soluções mais tradicionais de reforço, tais como resistência à tração elevada, facilidade de aplicação, grande durabilidade, capacidade de se adaptar à geometria da estrutura e peso reduzido (SOUZA; RIPPER, 1998).

Um aspecto importante a controlar durante as operações de recuperação e reforço de estruturas consiste no aumento da temperatura, principalmente em situação de incêndio. Oliveira (2012, p.85) define a resistência ao fogo de um elemento estrutural como:

O intervalo de tempo transcorrido desde o início de um incêndio normalizado, até o momento em que o elemento atinge a sua temperatura crítica. Isto é, a temperatura a partir da qual esse elemento deixa de satisfazer as funções de suporte de cargas para que foi projetado, com o limite de segurança estabelecido.

Para Marques (2018), as estruturas de concreto são conhecidas pela boa resistência ao incêndio em virtude das características térmicas do material, como baixa condutividade térmica, incombustibilidade e o fato de não exalar gases tóxicos, concedendo ao concreto uma boa resistência ao fogo. De acordo com Lima *et al* (2004), essas características fazem com que o concreto seja utilizado em alguns projetos como proteção passiva de estruturas de aço. Já os compósitos de matriz polimérica utilizados no reforço possuem comportamento muito diferente à temperatura ambiente quando expostos ao fogo, sendo extremamente sensíveis ao efeito da temperatura havendo severas reduções em sua capacidade mecânica, pois além de serem combustíveis geram gases tóxicos e uma densa fumaça preta (OLIVEIRA, 2012).

Jang (1996) define elemento compósito como a combinação de duas ou mais fases constituintes que interagem funcionando como um elemento único; no caso dos reforços estruturais uma das fases é a fibra de carbono, que absorve tensões impostas ao reforço,

e a outra é o adesivo, responsável por manter as fibras orientadas e aderidas ao substrato, também evitando a abrasão entre as mesmas durante os ciclos de carregamento.

Em altas temperaturas, o reforço perde sua capacidade de transferir esforços entre o concreto e o laminado devido à redução da resistência e do módulo de elasticidade do adesivo epóxi, sobretudo próximo à chamada de “temperatura de transição vítrea”, entre 60 °C e 80 °C, quando as transformações físico-químicas levam a perda da capacidade resistente, ocorrendo a volatilização do material (ARAUJO; COSTA; MORENO, 2017). Segundo Beber (2003) a resistência à ação de elevadas temperaturas sobre os compósitos de PRFC (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono) depende fundamentalmente da resina, uma vez que a fibra de carbono, individualmente, é capaz de manter suas propriedades mecânicas e de resistência até cerca de 1000 °C. A preocupação com materiais compósitos perante ao fogo é dada pelo fato de que eles foram desenvolvidos para melhorar as características mecânicas dos elementos a serem reforçados e, perdendo essas características, se tornam inúteis para cumprirem com seu propósito, assim comprometendo o elemento reforçado (PAVLÍK *et al.*, 2003).

A aplicação de revestimentos com materiais isolantes e incombustíveis sobre a superfície do elemento estrutural pode auxiliar na redução do gradiente térmico ao qual o mesmo estará submetido em casos de exposição a elevadas temperaturas, atuando como proteção passiva (LIMA, 2001). Martins (2000) classifica os revestimentos segundo o material constituinte, a morfologia e a técnica de colocação, destacando-se que quanto ao material constituinte pode-se ter alvenaria, concreto de cimento Portland, concreto leve, argamassa a base de cimento, de fibras minerais, de vermiculita ou de gesso, mantas de fibra cerâmica, de fibras minerais ou de lã de rocha, tintas intumescentes e outros.

A presente pesquisa visa analisar o uso de três métodos distintos de proteção passiva aplicados sobre o reforço com fibra de carbono com o intuito de minimizar os danos gerados pela ação de elevadas temperaturas na resina epóxi do compósito.

2 PESQUISAS DE DESEMPENHO DE PROTEÇÃO PASSIVA EM ELEMENTOS DE CONCRETO REFORÇADOS COM PRFC

Por se tratarem de materiais usuais em obras de engenharia civil, Lima, Silva Filho e Campagnolo (2002) investigaram o comportamento de proteções passivas conferidas por argamassa de revestimento e gesso quanto a elevadas temperaturas. O estudo envolveu a

análise de proteção passiva aplicada em corpos de prova prismáticos de concreto simples, com 40 x 40 x 160 mm reforçados com tecido fibra de carbono colado com epóxi na face inferior. A Figura 1 apresenta a aparência final dos modelos após terem sido revestidos.

Figura 1: modelos revestidos com argamassa de revestimento e gesso

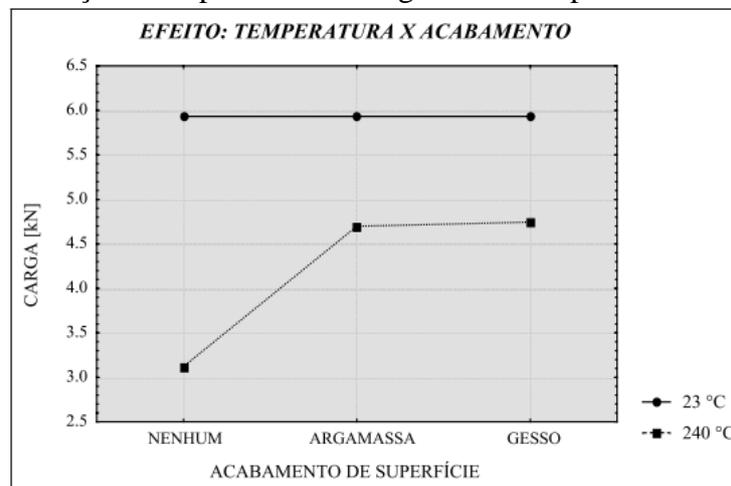


Fonte: Lima, Silva e Campagnolo (2002)

A avaliação consistiu em expor os elementos reforçados a diferentes patamares de temperaturas por determinados períodos de tempo, simulando uma situação de incêndio e, após o resfriamento, submetê-los a ensaios de flexão até sua ruptura. Os ensaios realizados demonstraram que a perda de desempenho do reforço é crescente com o aumento da temperatura e é ocasionada principalmente pela volatilização do adesivo epóxi utilizado para a formação do elemento composto.

Em relação à proteção passiva, tanto a aplicação de argamassa de revestimento quanto de gesso foi importante como forma de retardar a degradação do composto com a ação da temperatura, porém insuficientes para garantir a segurança estrutural. A Figura 2 mostra os resultados obtidos a temperaturas de 23 °C e 240 °C, demonstrando desempenho semelhante entre as duas formas de revestimento.

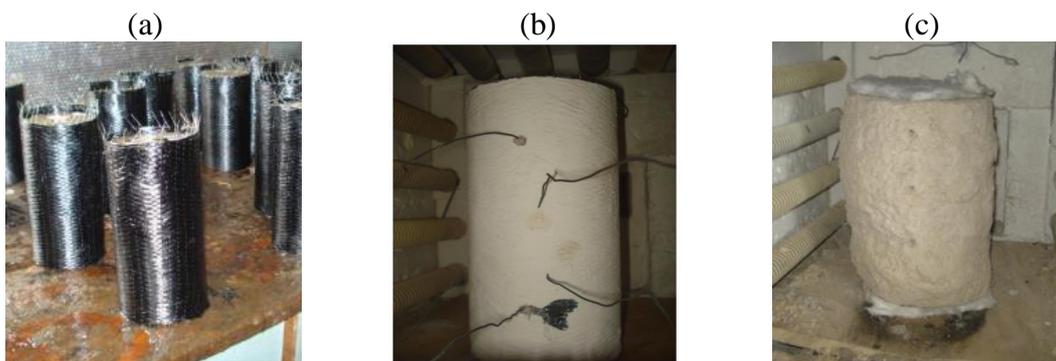
Figura 2: variação da capacidade de carga com a temperatura e revestimento



Fonte: Lima, Silva e Campagnolo (2002)

De forma análoga ao experimento de Lima, Silva Filho e Campagnolo (2002), Oliveira (2012) estudou corpos de prova cilíndricos de concreto reforçados com compósitos de fibras de carbono, expostos a temperaturas de 500°C a 1050 °C e revestidos com tinta intumescente e argamassa projetada (Figura 3).

Figura 3: (a) Reforço com PRFC (b) Revestimento com tinta intumescente (c) Revestimento com argamassa projetada



Fonte: Oliveira (2012)

Oliveira (2012) verificou que a pintura intumescente não garantiu proteção ao sistema de reforço, pois quando a tinta intumescente inicia o processo de proteção do elemento por meio de expansão volumétrica o tecido de fibra de carbono já se desprende do concreto, anulando sua função estrutural. Em relação aos corpos de prova revestidos com argamassa projetada, o sistema de reforço manteve-se intacto e completamente aderido ao substrato nos ensaios expostos a temperatura de 500 °C; para os ensaios a 700 °C parte da resina ficou em um estado gelatinoso, podendo voltar a aderir ao concreto e possivelmente exercer sua função como reforço, mesmo que parcialmente. Durante os ensaios a 1050 °C ocorreu o *spalling* do concreto, tendo sua ocorrência referida à possibilidade do compósito e argamassa de proteção terem impedido a saída de vapor da água do corpo de prova, contribuindo para o aumento de pressão nos poros do concreto (OLIVEIRA, 2012), sugerindo que o sistema pode se tornar explosivo durante um incêndio.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

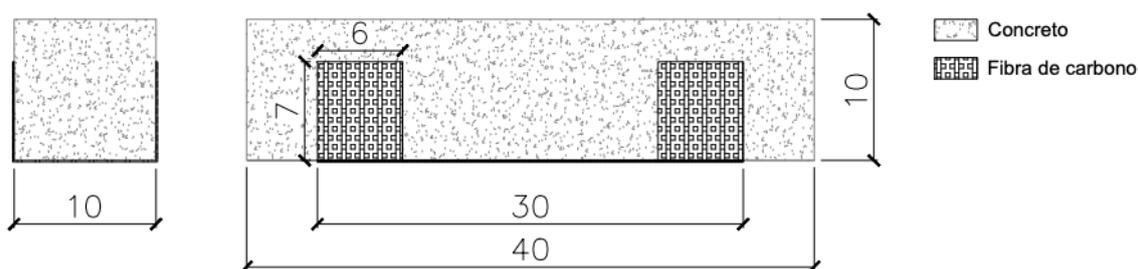
Este capítulo visa apresentar os procedimentos realizados durante o programa experimental, bem como descrever os materiais utilizados nos testes, os equipamentos e a metodologia utilizada na investigação do tema proposto. Os ensaios foram realizados nas dependências do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) da UFRGS.

3.1 Aspectos gerais

Tendo em vista que a resina epóxi ao atingir a temperatura de transição vítrea perde sua capacidade portante, desprendendo o tecido de fibra de carbono do elemento estrutural, o método de pesquisa objetivou avaliar experimentalmente o comportamento da resina revestida com três sistemas de proteção passiva frente a elevadas temperaturas: manta de fibra cerâmica, manta de lã de rocha e placas de gesso acartonado.

Os experimentos foram realizados em doze corpos de prova prismáticos de concreto simples com 10 x 10 x 40 cm não armados. O sistema de reforço com fibra de carbono foi executado na extensão da face inferior dos corpos de prova, com uma camada de 30 x 10 cm. Próximo aos apoios (zona de concentração de tensões de cisalhamento) foram dispostas faixas de fibra com 2/3 da altura da seção transversal, 6 cm de largura e 24 cm de comprimento no sentido longitudinal da viga, a fim de permitir uma melhor ancoragem e adequada transmissão dos esforços. O detalhamento dos corpos de prova e dimensões do reforço são apresentados na Figura 4.

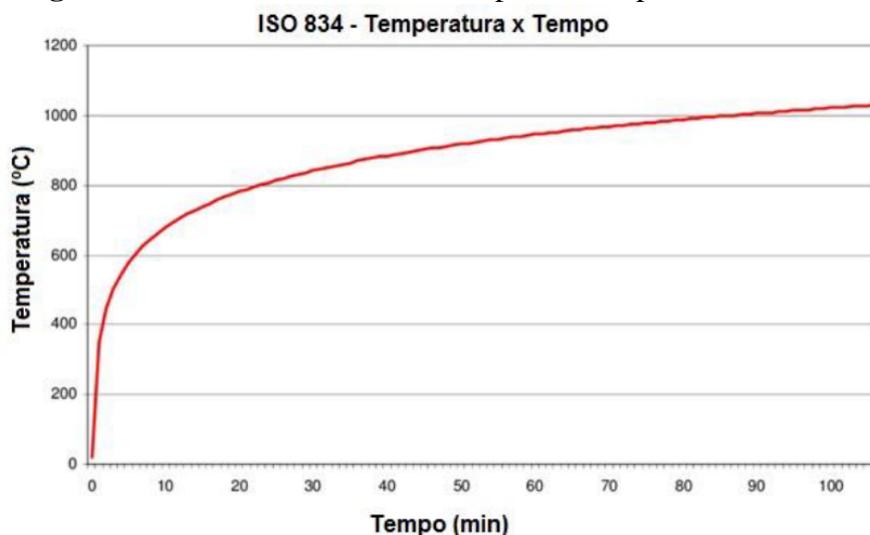
Figura 4: Dimensões e detalhamento do corpo de prova e reforço



Atualmente, a única forma de estimar o comportamento dos elementos de proteção passiva durante exposição ao fogo é através de modelos numéricos-computacionais (OLIVEIRA, 2012), portanto, não havendo parâmetros para definir a espessura dos materiais de revestimento. Com o intuito de diminuir as variáveis de pesquisa e por tratar-se de uma etapa exploratória, foram utilizadas as espessuras fornecidas pelos fabricantes. Segundo Costa e Silva (2006), a modelagem de um incêndio é feita por meio de curvas temperatura-tempo, as quais associam o crescimento da temperatura em função do tempo de duração do incêndio, estimando a temperatura máxima dos gases no ambiente em chamas. Por ocorrer alterações na curva temperatura-tempo em cada caso estudado, adotou-se uma curva padrão como modelo para análise experimental de estruturas e

materiais de proteção térmica. A curva padronizada mais recomendada e difundida internacionalmente é a da ISO 834 (1999).

Figura 5: curva modelo de incêndio padrão adaptada da ISO 834



Fonte: Sleifer (2017)

Como disposto na bibliografia, a volatilização total da resina ocorre em temperaturas por volta dos 350 °C, portanto, optou-se por realizar os ensaios em uma temperatura de 500 °C por ser superior à temperatura de decomposição da resina. Se concluído que os revestimentos protegem o sistema de reforço a temperatura de 500 °C, faz-se possível realizar ensaios com valores superiores.

As estruturas são dimensionadas para resistirem um tempo mínimo de exposição a uma ação padronizada, chamado de Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF). Segundo a NBR 14432 (2001), os elementos construtivos devem resistir ao fogo por um tempo mínimo especificado em função da ocupação e altura da edificação, variando de 30 a 120 minutos. Por tratar-se de uma análise experimental quanto à eficiência da resistência ao fogo do material de revestimento, utilizou-se o tempo mínimo de 30 minutos de exposição após atingir o patamar desejado de 500 °C.

3.2 Moldagem dos corpos de prova

Para garantir a não ocorrência de *spalling* explosivo do concreto e atingir uma resistência característica à compressão de 25 MPa, foi adotado um traço comumente utilizado no laboratório e referenciado no histórico de outras pesquisas envolvidas, como nos trabalhos de Farias (2015), Bidinotto (2018) e Marques (2018). Seguiu-se, portanto, a

proporção de 1:2,9:3,6 (cimento:areia:brita), com relação água/cimento (a/c) de 0,65. Tendo em vista o volume necessário de concreto, realizaram-se duas etapas de concretagem: na primeira etapa, foram concretadas seis vigas e três corpos de prova cilíndricos para controle tecnológico. Na segunda etapa foram concretadas outras seis vigas, atingindo através do ensaio de abatimento de tronco de cone consistências de 20,5 cm e 18,5 cm para a primeira e segunda concretagem, respectivamente. A Tabela 1 apresenta um resumo das vigas moldadas nesta pesquisa, com a indicação de presença de revestimento e exposição a elevadas temperaturas.

Tabela 1: Corpos de prova moldados e condições de ensaio à flexão.

Corpo de prova	Especificação
V01	CP reforçado em temperatura ambiente
V12	CP sem reforço em temperatura ambiente
V10 e V11	CP sem reforço em situação de incêndio
V06 e V07	CP reforçado em situação de incêndio
V02 e V09	CP reforçado e revestido com manta de lã de rocha em situação de incêndio
V03 e V05	CP reforçado e revestido com manta de fibra cerâmica em situação de incêndio
V04 e V08	CP reforçado e revestido com gesso acartonado em situação de incêndio

Os materiais utilizados na composição do concreto foram:

- Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), sendo todo o cimento proveniente de um mesmo lote;
- Agregado graúdo basáltico de origem natural, livre de matérias orgânicas e impurezas, classificado como brita 1 pela composição de sua curva granulométrica;
- Agregado miúdo de origem natural, caracterizado como areia média proveniente do Rio Jacuí, livre de matérias orgânicas e impurezas.

Finalizada a moldagem (Figura 6) e posterior desforma dos elementos iniciou-se o processo de cura do concreto em câmara úmida, com temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa superior à 95%. As etapas de cura e moldagem dos corpos de prova foi realizada conforme a NBR 5738 - "Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova" (ABNT, 2016).

Figura 6: Moldagem dos corpos de prova da primeira concretagem



Por tratar-se inicialmente de uma análise exploratória, as etapas de aplicação de reforço, revestimento, exposição a elevadas temperaturas e ensaio à flexão ocorreram em duas fases, sendo a segunda realizada ao término da primeira, com o propósito de obter um melhor entendimento sobre os resultados parciais obtidos. Para a primeira etapa, a retirada dos corpos de prova da câmara úmida e aplicação do reforço ocorreu após 63 dias, enquanto as vigas para a segunda etapa permaneceram armazenadas por 271 dias no interior da câmara.

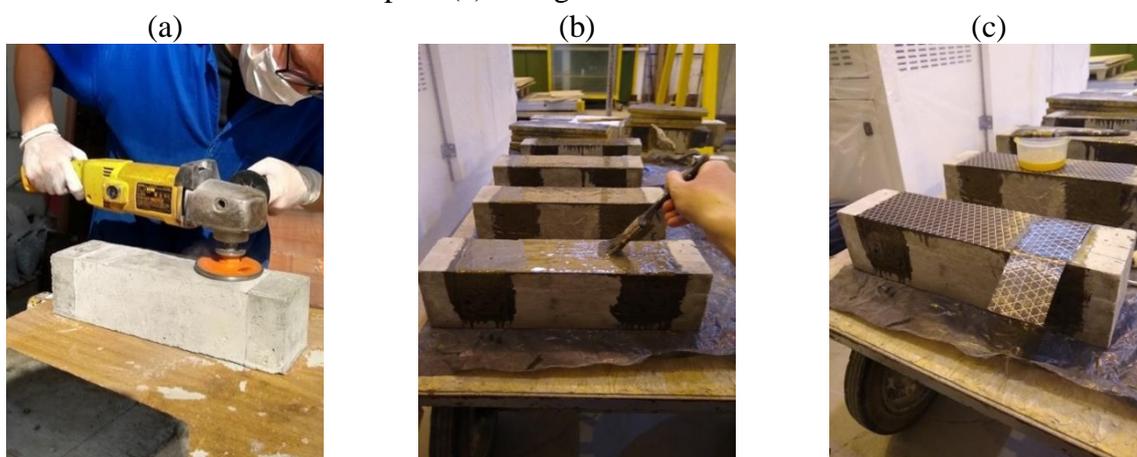
3.3 Aplicação do reforço

A aplicação do reforço seguiu os procedimentos mencionados no ACI 440.2R-17 Committee (2017). O preparo da superfície consistiu na remoção da nata de cimento da área a ser reforçada com o auxílio de uma lixadeira com disco diamantado, assim como o arredondamento das laterais que abrangem a fibra de carbono, com o objetivo de remover partículas frágeis e não aderidas que prejudicassem a aderência do tecido de fibra de carbono na superfície. Após, efetuou-se o procedimento de limpeza a seco da superfície para a remoção das partículas resultantes do processo de polimento. Preparado o substrato, a superfície foi impermeabilizada com uma camada de resina de regularização (primer), com a função de preencher pequenas cavidades e saliências presentes no substrato, a fim de proporcionar uma superfície lisa garantindo uma boa aderência entre a fibra de carbono e o elemento estrutural.

Após um período de uma hora, suficiente para a cura do primer, aplicou-se uma camada de aproximadamente 1 mm de resina de saturação, de origem epóxi, homogeneizada

separadamente a partir da mistura manual com seu componente endurecedor, seguindo as proporções indicadas pelo fabricante. Com a resina aplicada no elemento estrutural procedeu-se a aplicação do tecido de fibra de carbono, fixado com o auxílio de um rolo para retirar bolhas de ar existentes na interface do reforço com o concreto. Em sequência, aplicou-se outra camada de resina epóxi sobre a fibra fixada para a colagem das faixas transversais de fibra de carbono, finalizando com uma última camada de resina sobre a manta como forma de garantir que todo o tecido de fibra de carbono esteja envolto em uma matriz de resina epoxídrica saturante. A Figura 7 apresenta passos da aplicação do reforço.

Figura 7: Passos da aplicação do reforço (a) Preparação da superfície (b) Aplicação da resina epóxi (c) Colagem da fibra de carbono



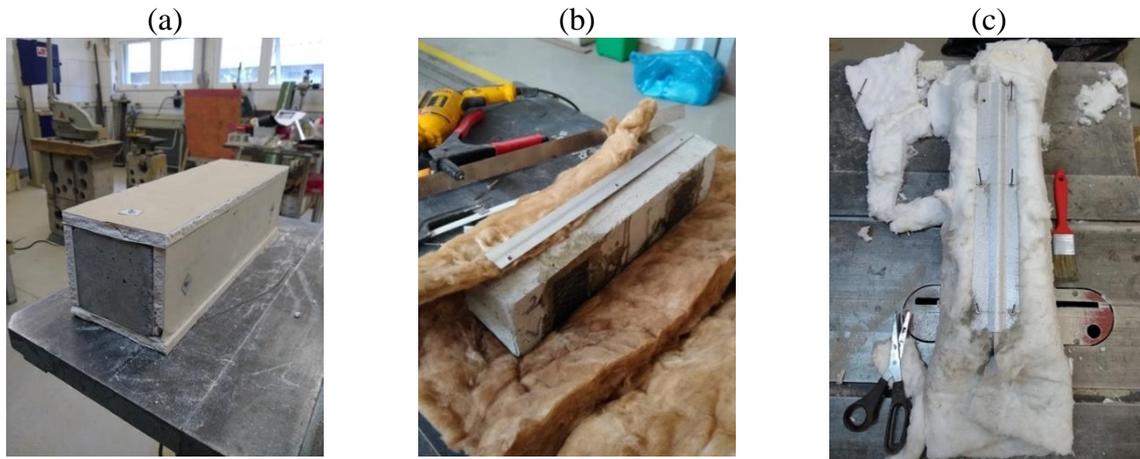
3.4 Aplicação do sistema de proteção ao fogo

Três sistemas de proteção ao fogo foram avaliados, manta de lã cerâmica, manta de lã de rocha e gesso acartonado, sendo o primeiro disponibilizado pelo LEME e os dois últimos doados pela empresa Millforross, de Novo Hamburgo.

As chapas de gesso acartonado, de espessura 120 mm, foram cortadas de forma a constituir um caixote para acomodar o corpo de prova, enquanto as mantas de lã cerâmica e de rocha, com variações de 100 a 200 mm de espessura, envolveram os corpos de prova tendo suas extremidades unidas e fixadas no elemento estrutural através de uma chapa metálica. Com o auxílio de uma furadeira os corpos de prova foram previamente perfurados, demarcando os pontos de fixação dos revestimentos aos corpos de prova, esta realizada através de fixadores mecânicos (rebites), técnica de fácil utilização em campo, considerando as dificuldades de acesso aos elementos a serem reforçados. Com o intuito de evitar a propagação da alta temperatura para o elemento revestido foi aplicada uma

mistura de gesso em pó entre as arestas das faces das placas de gesso acartonado, garantindo maior cobertura vedando os vazios existentes. A Figura 8 apresenta o processo de aplicação dos revestimentos.

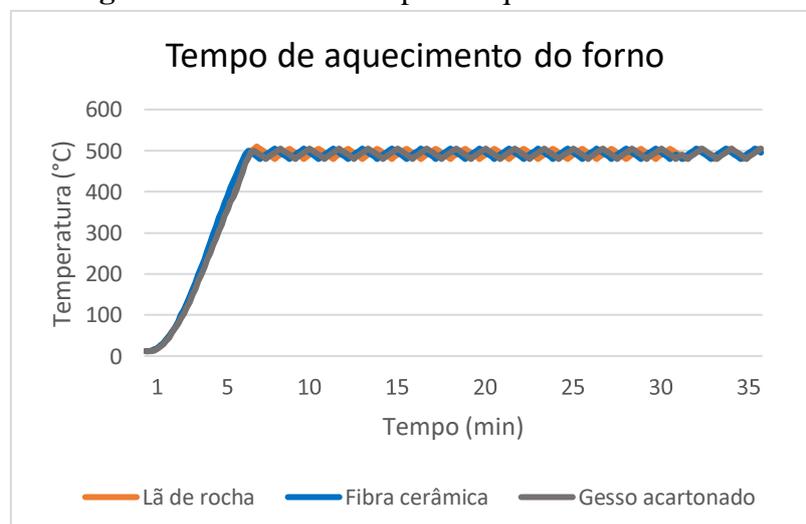
Figura 8: Processo de aplicação dos revestimentos (a) Gesso acartonado (b) Manta de lã de rocha (c) Manta de fibra cerâmica



3.5 Exposição a elevadas temperaturas

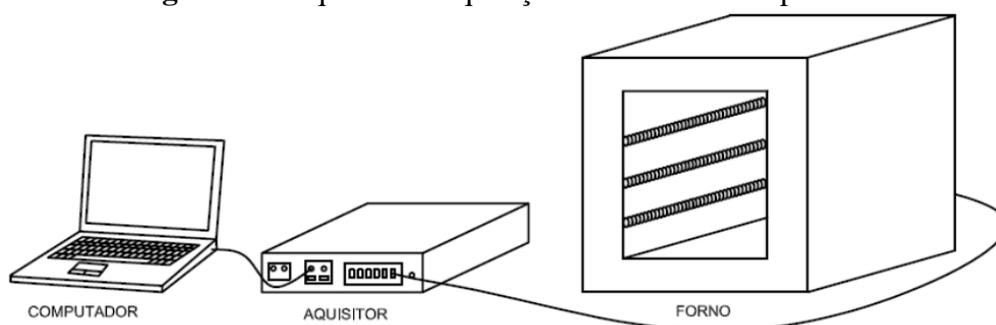
Devido à indisponibilidade de uma câmara de fogo, os elementos estruturais foram expostos a elevadas temperaturas em um forno elétrico, simulando a temperatura que o elemento estrutural ficaria sujeito se estivesse em uma situação real de incêndio. Com capacidade de atingir temperaturas de até 1340 °C o forno conta com controlador eletrônico que permite a programação do patamar de temperatura a ser mantida e sua taxa de aquecimento, atingindo a temperatura desejada de 500 °C em aproximadamente 6 minutos, conforme aferido e demonstrado na Figura 9.

Figura 9: Gráfico do tempo de aquecimento do forno



Para monitorar a temperatura real interna do forno e na resina epoxídrica saturante do sistema de reforço, dois termopares do tipo K, com faixa de medição de temperatura entre -90°C e 1380°C , foram instalados conectados a um equipamento de aquisição de dados (Figura 10). Objetivando medir a temperatura na resina, um dos termopares foi instalado entre o corpo de prova reforçado e o revestimento utilizado, enquanto o outro foi posicionado dentro do forno de forma a medir a temperatura real interna do forno. A aferição das temperaturas por meio dos termopares só foi possível de ser realizada na segunda fase da pesquisa.

Figura 10: esquema de aquisição de dados de temperatura



Fonte: Oliveira (2012)

Após atingida a temperatura desejada de 500°C , os elementos foram mantidos neste patamar de temperatura por 30 minutos, como definido nas premissas do plano experimental. Finalizado este período, o forno foi desligado, iniciando a etapa de resfriamento natural dos elementos até ser possível a sua retirada manualmente de dentro do forno. A Figura 11 mostra o posicionamento dos corpos de prova no forno, assim como o ponto de instalação do termopar interno.

Figura 11: corpo de prova posicionado no forno (gesso acartonado)



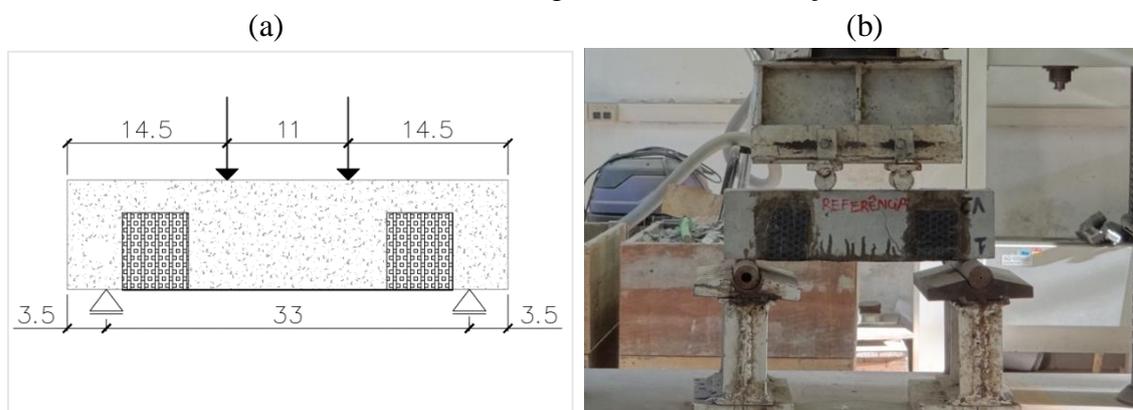
Dois elementos estruturais reforçados e uma viga testemunho foram também submetidos a elevadas temperaturas, visando assegurar informações adquiridas na bibliografia quanto ao comportamento da resina e adquirir assim uma maior quantidade de dados comparativos entre elementos submetidos e não submetidos a elevadas temperaturas, analisando a eficiência do revestimento com proteções passivas.

3.6 Ensaio de resistência à flexão

Para a determinação da resistência a flexão seguiu-se os procedimentos da NBR 12142 – “Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos” (ABNT, 2010). Deste modo, realizou-se a retirada da proteção passiva que envolvia os elementos estruturais, os quais foram dispostos, separadamente, em uma prensa hidráulica Shimadzu com capacidade de carga de 2000 kN e taxa de aplicação de carga de 0,5 mm/min. Durante os ensaios, o carregamento aplicado foi medido através de um sistema de aquisição de dados monitorado por um computador.

O ensaio de resistência a flexão consistiu na colocação dos corpos de prova sobre dois apoios de primeira ordem, distantes 3,5 cm das extremidades inferiores do corpo de prova, recebendo a aplicação de duas cargas concentradas de igual intensidade distantes 11 cm entre si até a ruptura do elemento, conforme esquema apresentado na Figura 12a. Na Figura 12b pode-se visualizar a viga reforçada em temperatura ambiente sendo submetida ao carregamento.

Figura 12: Esquema de aplicação de carga (a) Esquema de aplicação de carga (b)
Ensaio à flexão da viga testemunho reforçada



4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados. Primeiramente, serão apresentados os dados de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos, buscando o controle tecnológico do concreto utilizado. Em seguida, será realizada uma análise comparativa da resistência à tração dos corpos de prova reforçados e não reforçados frente a elevadas temperaturas, assim como uma análise visual dos corpos de prova revestidos após exposição à situação de incêndio. Por fim, são apresentados e comparados os dados obtidos nos ensaios de flexão dos corpos de prova revestidos, determinando a efetividade do uso das proteções passivas aplicadas.

4.1 Controle tecnológico do concreto

Os resultados da ruptura em compressão uniaxial dos corpos de prova cilíndricos moldados na primeira concretagem encontram-se na Tabela 2, com desvio de 1,96 MPa.

Tabela 2: Resistência à compressão do concreto

Corpo de prova	Carga de ruptura (MPa)
CP1	46,17
CP2	42,93
CP3	46,46
Média	45,19

Observa-se que os valores apurados no ensaio foram superiores ao valor esperado de 25 MPa, o que pode ser consequência do tempo de cura em câmara úmida, visto que os corpos de prova cilíndricos ficaram acomodados na câmara por 322 dias.

4.2 Efeito da temperatura no reforço com fibra de carbono

Com o objetivo de verificar os dados adquiridos na bibliografia referente ao comportamento da resina epoxídrica e do concreto em situação de incêndio, a Figura 13 apresenta o gráfico dos resultados de carga obtidos do ensaio de tração na flexão dos corpos de prova com e sem PRFC, em temperatura ambiente e expostos aos 500 °C. Devido a uma possível excentricidade do corpo de prova, uma viga testemunho e uma viga reforçada expostas a elevadas temperaturas romperam ao serem posicionadas na

prensa sem a aplicação da carga, sendo descartadas nos resultados do ensaio, restando a utilização de um modelo de corpo de prova para cada situação estudada. A execução do reforço conferiu aos corpos de prova um aumento de 178,8% na sua capacidade de carga na temperatura ambiente e observa-se, através da análise dos resultados, que a exposição a elevadas temperaturas influenciou na capacidade de carga tanto para os corpos de prova não reforçados quanto para os reforçados com tecido de fibra de carbono. Nos corpos de prova não reforçados observou-se um decréscimo de 63,13% na carga suportada pelo elemento estrutural, enquanto para os modelos reforçados com PFRC o decréscimo foi de 86,61%, verificando-se que o reforço foi totalmente destruído em função da volatilização total da resina epóxi manifestando a necessidade da utilização de proteção passiva. Salienta-se que a pesquisa do efeito da temperatura no reforço tem caráter exploratório, sendo necessária a realização de um maior número de ensaios para confirmar o comportamento. A Figura 14 apresenta o aspecto dos corpos de prova reforçados após a exposição a elevadas temperaturas.

Figura 13: Cargas de ruptura dos corpos de prova com e sem PRFC

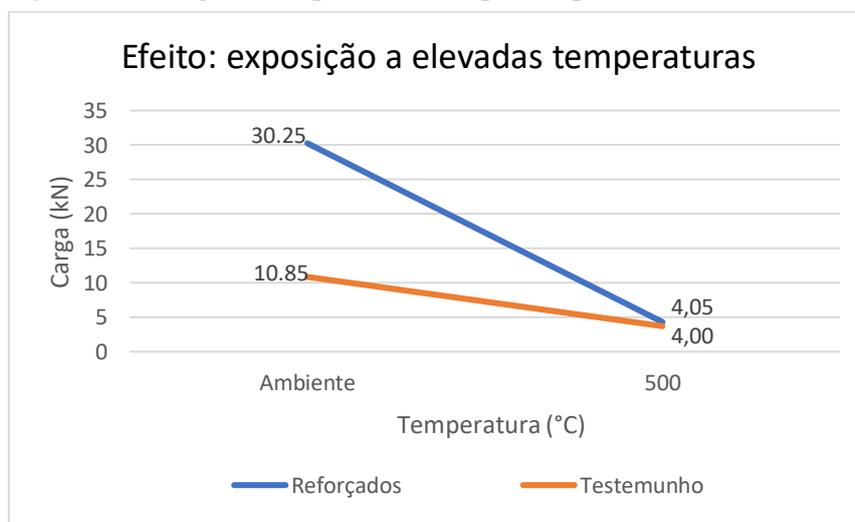


Figura 14: Aspecto do corpo de prova reforçado exposto a elevadas temperaturas

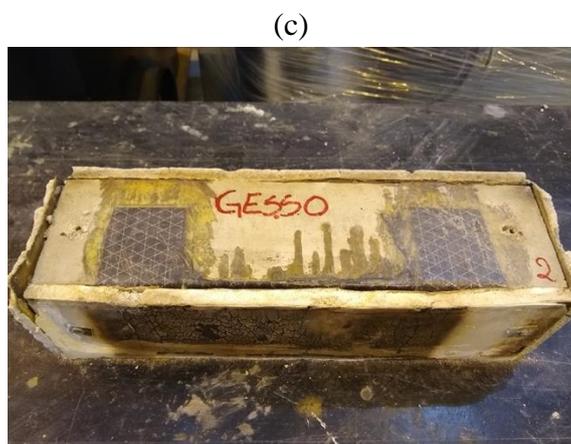


4.3 Análise visual dos corpos de prova revestidos

A Figura 15 apresenta o estado final dos corpos de prova revestidos após o período de exposição à temperatura de 500 °C. Na Figura, observa-se que em (a) ocorreu uma redução externa da tonalidade do revestimento, indicando uma possível diminuição da propagação da temperatura à face interna da manta de lã de rocha, enquanto o revestimento com manta de fibra cerâmica (b) não apresentou alterações visuais após o período de aquecimento. Quanto ao revestimento com gesso acartonado (c) observa-se uma completa queima do papel cartão envolto às placas de gesso, assim como a ruptura e fácil deslocamento do gesso utilizado na vedação das arestas das placas.

Visualmente, a ação das elevadas temperaturas não aparentou degradar o sistema PRFC dos elementos estruturais revestidos, visto que em nenhum dos três casos a resina apresentou sinais de derretimento ou decomposição, mantendo o tecido de fibra de carbono aderido ao substrato dos corpos de prova.

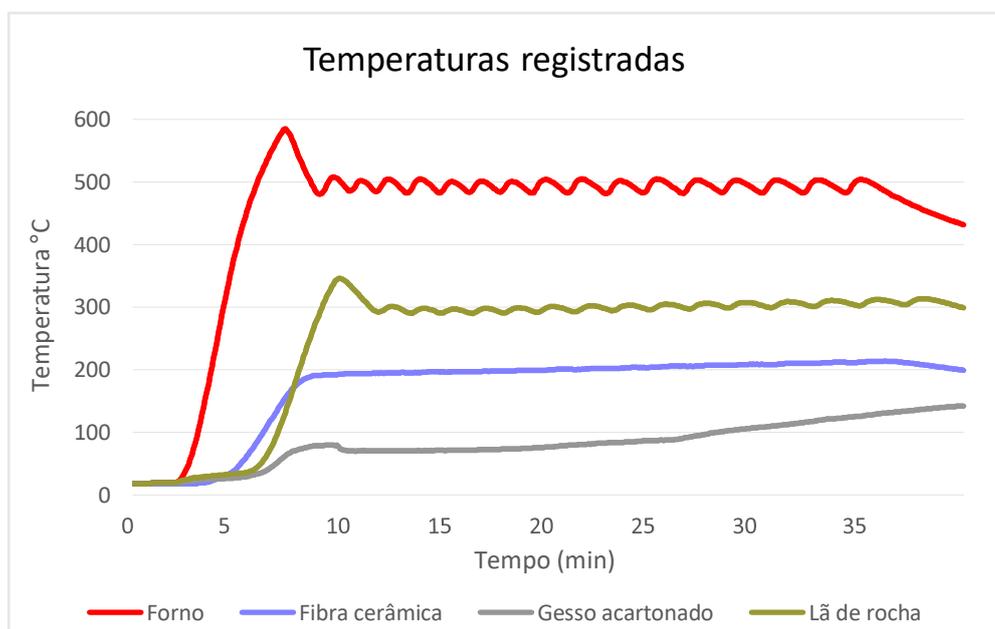
Figura 15: Aspecto do corpo de prova pós exposição à situação de incêndio (a) Manta de lã de rocha (b) Manta de fibra cerâmica (c) Gesso acartonado



4.4 Efeito da temperatura nos corpos de prova revestidos

A Figura 16 mostra o gráfico das temperaturas registradas pelos termopares, durante o tempo de exposição à situação de incêndio, no interior do forno e na região de aplicação do reforço estrutural revestido. A temperatura máxima atingida na superfície do reforço foi de 346 °C para a proteção com manta de lã de rocha, 214 °C para a manta de fibra cerâmica e de 147 °C para o gesso acartonado. Apesar de visualmente o sistema de reforço não apresentar manifestações patológicas, para os três sistemas de proteção a temperatura atingida superou a temperatura de transição vítrea da resina, em torno de 60 °C e 80 °C, como disposto na bibliografia.

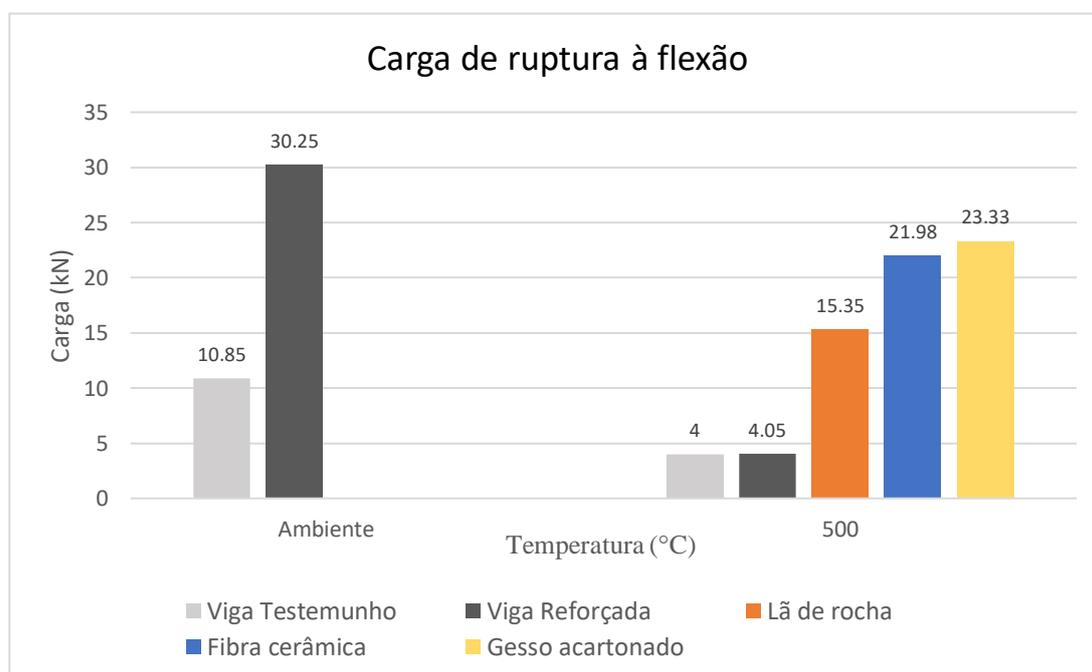
Figura 16: Temperaturas registradas durante os ensaios



A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos das cargas de rupturas dos corpos de prova reforçados e revestidos com os três métodos de proteção passiva nos ensaios de tração na flexão. Junto da leitura das temperaturas na superfície do reforço, os valores das cargas suportadas pelas vigas mostram que mesmo com a proteção contra o fogo o sistema não foi capaz de manter a temperatura na interface do PRFC/concreto abaixo da temperatura de transição vítrea. Entretanto, como disposto no gráfico comparativo presente na Figura 17, o sistema de proteção melhorou de forma considerável a resistência ao fogo dos elementos de concreto.

Tabela 3: Cargas de ruptura à flexão dos corpos de prova revestidos

Revestimento	Corpo de prova	Carga de ruptura (kN)	Média (kN)
Manta de lã de rocha	V02	20,60	17,35
	V09	14,10	
Manta de fibra cerâmica	V03	22,60	21,98
	V05	21,35	
Gesso acartonado	V04	25,45	23,33
	V08	21,20	

Figura 17: Gráfico comparativo da carga de ruptura dos corpos de prova estudados

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa permitiu a comprovação prática da eficácia da técnica de recuperação e reforço de elementos com tecido de fibra de carbono em temperatura ambiente. Por outro lado, evidenciou-se que a segurança estrutural dos elementos reforçados foi comprometida ao serem submetidos a elevadas temperaturas, verificando-se a perda de desempenho do reforço ocasionada principalmente pela volatilização do adesivo epóxi, desintegrando o sistema. As referências reunidas neste trabalho indicam que a resistência dos elementos reforçados com compósitos só pode ser garantida durante a exposição a um incêndio se a temperatura da interface PRFC/concreto for mantida abaixo da

temperatura de transição vítrea, entre 60 °C e 80 °C, a partir da qual o compósito deixa de oferecer confinamento adequado ao sistema. Logo, em situação de incêndio, o acréscimo de resistência provido pelo reforço com CFRP deve ser desprezado em elementos desprotegidos.

Como objetivo principal do trabalho avaliou-se o comportamento de proteções passivas aplicadas sobre o reforço, visando retardar a perda de desempenho e garantir a integridade da estrutura por um maior intervalo de tempo em casos de incêndio. Os resultados obtidos indicaram que tanto a manta de lã de rocha quanto a manta de fibra cerâmica e o gesso acartonado foram importantes como forma de retardar a degradação do elemento compósito. Apesar de não garantirem a mesma resistência que o reforço oferece à temperatura ambiente, verificou-se que a perda na capacidade de carga foi muito menor para os modelos que apresentavam proteção passiva, mostrando a eficácia da utilização dos revestimentos, sobretudo do gesso acartonado. Um dos motivos para a perda da capacidade de carga dos elementos revestidos pode ser atribuído a espessura utilizada dos revestimentos, de maneira que a proteção permitiu ainda a passagem de elevados índices de temperatura para a interface do sistema estrutural.

Como sugestão para trabalhos futuros ante esta análise exploratória, recomenda-se um estudo com um maior número de corpos de prova e variadas espessuras dos métodos de proteção utilizados, assim como a aplicação de diferentes materiais de revestimento com características físicas e mecânicas inerentes ao material PRFC em situação de incêndio. Além disso, sugere-se a análise de diferentes condições de exposição dos elementos às altas temperaturas, incluindo a temperatura máxima, o tempo de exposição e a taxa de aquecimento.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.2R-17**. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Committee 440. p. 116. Detroit, USA, 2017

ARAÚJO, C. J. R. V; COSTA, C. N; MORENO, A. L. **Estado da arte do desempenho em altas temperaturas de elementos de concreto reforçados com fibras de carbono e com diferentes tipos de proteção passivas**. In: 4o CILASCI – Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança contra Incêndio, 2017, Pernambuco, 2017, p. 269–278.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2001

BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 317, 2003.

BIDINOTTO, G. **Análise experimental de capacidade de carga residual e spalling em pilares de concreto armado com concretos de diferentes classes de resistência em situação de incêndio**. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 80, 2018.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio. *In*: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NUTAU'2006 – INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E SUSTENTABILIDADE, 2006, São Paulo. **NUTAU'2006**. São Paulo: NUTAU/FAUUSP, 2006.

FARIAS, P. V. **Pilares de concreto armado com armaduras corroídas submetidas a altas temperaturas: capacidade portante pós deterioração**. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 97, 2015.

JANG, Bor. **Advanced polymer composites**. 2.ed. Ohio, USA:ASM International, p.297, 1996.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834: Fire-Resistance Tests – Elements of Building Construction - Part 1: General Requirements** - International Standard, Genève, 1999.

LIMA, R. C. A. **Investigação dos Efeitos de Temperaturas Elevadas em Reforços Estruturais com Tecidos de Fibra de Carbono**. Dissertação de Mestrado em Engenharia - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 140, 2001.

LIMA, R.C.A.; KIRCHHOF, L.D.; CASONATO, C.A.; SILVA FILHO, L.C.P. **Efeito de altas temperaturas no concreto**. *In*: II Seminário de Patologia das Edificações “Novos Materiais e Tecnologias Emergentes”. Porto Alegre, RS. Novembro de 2004.

LIMA, R. C. A; SILVA FILHO, L. C. P. da; CAMPAGNOLO, J. L. **Revestimento com proteção passiva de elementos estruturais reforçados e submetidos a elevadas temperaturas**. *In*: ENTAC 2002 - IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, p. 1199–1210, 2002.

MARQUES, D. B. **Reforço de pilaretes de concreto armado expostos a altas temperaturas com a utilização de tecido de fibra de carbono.** Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 84, 2018.

MARTINS, M. M. **Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, p. 232, 2000.

OLIVEIRA, C. R. **Sistemas de Proteção Para Concreto Reforçado com CFRP em Situação de Incêndio.** Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, p. 313, 2012.

PAVLÍK, J.; PODĚBRADSKÁ, J.; TOMAN, J.; ČERNÝ, R. **Thermal Properties of Carbon- and Glass Fiber Reinforced Cement Composites in High Temperature Range in a Comparison with Mortar and Concrete.** In: Thermophysics 2002. Constantine the Philosopher University in Nitra, p. 47-52, Nitra, 2003.

SLEIFER, M. **Avaliação da degradação da fibra de carbono aplicada como reforço sob o efeito de elevadas temperaturas.** Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil), Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, p. 80, 2017.

SOUZA, V. C. de; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: Pini, 1998.