

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM BARRAS POLIMÉRICAS SUBMETIDOS À ALTAS TEMPERATURAS

SOUZA, Marina Luiza de.¹PERES, Maria Vânia Nogueira do Nascimento.²

RESUMO

Com o aumento da tecnologia e inovação, o ramo da construção civil vem explorando outras propostas de materiais para os métodos construtivos, os quais pode carrear à redução de custos e prejuízos ambientais, e na melhoria do comportamento estrutural. Um novo conceito que atende a esses critérios, e que vem ganhando potencial de emprego na construção civil, é a barra de fibra de vidro, mais conhecida como barras de GFRP (*Glass Fiber Reinforced Plastic*), por ter uma característica muito importante de alta resistência à tração e baixa densidade quando comparada ao aço convencional. Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de vigas de concreto armado poliméricas submetidos a altas temperaturas sob esforços de flexão, bem como caracterizar o concreto sob ação de esforços de compressão, e analisar o comportamento à flexão em vigas de barras de aço submetidas a altas temperaturas. Para o estudo, foram utilizados 11 corpos de prova, sendo 3 cilíndricos, para determinação da resistência característica do concreto à compressão, que deverão apresentar 25MPa aos 28 dias, e 8 corpos de prova prismáticos, sendo dois com a fibra de vidro e dois com aço estrutural em temperatura ambiente; dois para concreto armado com aço estrutural e dois com barras de fibra de vidro, os quais foram submetidos a uma temperatura de 1000°C e resfriamento brusco para ensaios de flexão para determinação da resistência à tração. Com o trabalho, foi possível identificar que a resistência da barra GFRP para os dois ambientes foi superior à do aço, porém, deve-se levantar estudos para saber qual a temperatura de fusão da barra de fibra de vidro, uma vez que, para 1000°C, esta já se encontrava fundida.

PALAVRAS-CHAVE: Barra de fibra de vidro, Concreto, Aço, Incêndio, Comparativo.

1 INTRODUÇÃO

Com a finalidade de utilizar um material que seja mais resistente às obras da construção civil, o concreto armado é um dos mais usuais, já que apresenta alta resistência à compressão, porém, apresenta baixa resistência à tração. Dessa forma, é necessário adicionar um material que traga essa resistência que está ausente na composição, tornando-se um elemento composto (concreto e armadura). Surge, então, o chamado concreto armado, em que as barras da armadura absorvem as tensões de tração e o concreto absorve as tensões de compressão, no que pode ser auxiliado também

¹Discente, Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel – PR. E-mail: mlsouza@minha.fag.edu.br

²Docente, Mestre, Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel – PR. E-mail: vaniperes@gmail.com

por barras de aço (caso típico de pilares, por exemplo) (BASTOS, 2006). O autor ainda ressalta que o trabalho desses dois materiais é possível porque os seus coeficientes de dilatação térmica são praticamente iguais.

As estruturas de concreto devem ser averiguadas em situações de incêndio para a garantia dos projetos, bem como a segurança daqueles que usufruem da construção, com o intuito de evitar catástrofes. O aço é um bom condutor de calor, ou seja, a temperatura é uniformizada muito rapidamente na secção das peças. Por esse motivo, e dado que as armaduras possuem secções pequenas, é usual considerar-se a temperatura das barras constante em toda a sua secção. O aço é um melhor condutor térmico comparado ao concreto, dessa forma, o calor se propaga mais rápido nas barras, e o concreto permanece com uma temperatura mais baixa. Com isso, quando a construção se encontra no cenário de incêndio, o concreto atua como uma barreira de proteção das armaduras (LASKE e ABRAHIM, 2018).

Porém, estudos e pesquisas estão explorando outras propostas de materiais que tornam equipamentos e produtos mais eficazes, eficientes, versáteis e que não prejudiquem o meio ambiente, atendendo aos requisitos necessários para as estruturas. Uma dessas propostas, que está sendo analisada e testada, é a substituição do aço pela fibra de vidro. As barras de fibra de vidro apresentam condutividade térmica tão baixa que se tornam insignificante (cerca de $0,046 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$) comparada ao aço ($80,4 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$). Com isso, tornam-se muito mais segura à estrutura exposta a altas temperaturas, além dos outros inúmeros benefícios, como a alta resistência à tração, até 1100 MPa, enquanto o aço CA-50 pode apresentar até 500 MPa, ou seja, chegando a ser 3 vezes maior, elevando o suporte e segurança de estruturas de concreto (COMPOSITE GROUP, 2021).

Das informações citadas, a justificativa para a realização deste estudo é analisar se os materiais se comportam da maneira em que são especificados em normas, quando submetidos a altas temperaturas, para que, assim, possam garantir a segurança da estrutura quando estiver em cenário de incêndio, a qual não deve propagar o fogo.

Nesse sentido, este trabalho acadêmico se justifica dentro de uma relevância social para atender às resistências e qualificações especificadas de cada insumo, para que cada um seja utilizado da melhor forma, conforme seus comportamentos e exposições, a fim de acatar aquilo que está sendo solicitado, não comprometendo as estruturas e os usuários.

A análise comportamental de viga de concreto armado com barras poliméricas a altas temperaturas é uma questão importante a ser estudada, já que a sua utilização vem crescendo a cada dia na construção civil, visando substituir o aço. Convém abordar que este estudo tem a razão de

apresentar resultados dos materiais acima descritos, submetidos a temperaturas elevadas por ensaios de compressão axial e tração na flexão, demonstrando seus comportamentos, para que sejam tomadas as escolhas corretas para a utilização do insumo adequado para tal cenário, garantindo a segurança.

Para tanto, a pergunta a ser respondida com a realização desta pesquisa é: Como se comporta o concreto armado com barras de fibra de vidro GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) em comparação ao concreto armado com barras de aço, quando submetidos a altas temperaturas?

De acordo com todas as informações expostas anteriormente, este trabalho terá como objetivo geral analisar o comportamento de vigas de concreto armado poliméricas submetidos a altas temperaturas.

Salienta-se que para que este trabalho científico possa ter pleno êxito, os seguintes objetivos específicos serão propostos:

- a) Caracterizar o concreto sob ação de esforços de compressão;
- b) Analisar o comportamento à flexão em vigas de barras de aço submetidas a altas temperaturas;
- c) Analisar o comportamento à flexão em vigas com barras de GFRP a altas temperaturas.

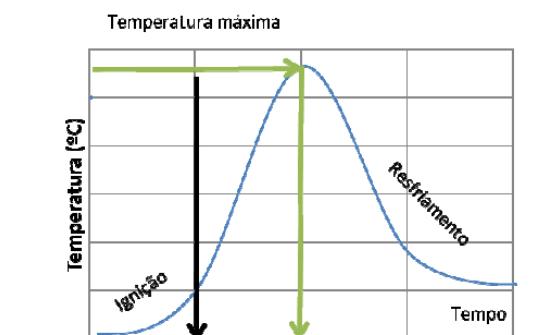
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INCÊNDIO

Sobre o incêndio, Silva (1997) ressalva que no âmbito do estudo das estruturas, o que melhor o caracteriza é a curva que concede a temperatura dos gases em função do tempo de incêndio, sendo que, a partir dela, pode-se calcular a temperatura máxima que as peças estruturais atingem e, portanto, sua resistência a altas temperaturas.

As curvas que melhor o descrevem tanto na fase de aquecimento, como na de resfriamento, são as curvas naturais (Figura 1). Essas curvas podem ser definidas por características do compartimento, como: grau de ventilação, aberturas, características dos materiais combustíveis presente no compartimento e características térmicas do material constituinte da compartimentação (COSTA et al., 2002).

Figura 1 – Curva temperatura-tempo



Fonte: ISO 834, 1994.

2.2 COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS DO CONCRETO EM ALTAS TEMPERATURAS

2.2.1 Água

Sob altas temperaturas, a dilatação térmica da água induz o desenvolvimento de lascamentos do concreto por intervenção dos gradientes de pressão relacionados à vaporização e transporte de grandes porções de água (KALIFA et al., 2000).

Por isso, a relação água/cimento é de suma importância, já que o excesso na pasta de cimento secunda a construção de gradientes significativos de pressão nos poros do concreto ao decorrer da evaporação da água e liberação de ar incorporado e, com a contração da pasta, após os 100°C, a ampliação das fissuras. Dessa forma, o excesso de água na pasta contribui na sua desagregação acelerada.

2.2.2 Pasta de cimento *Portland*

Admite-se que a desestruturação química concreta da pasta de cimento inicializa a partir dos 180 °C (KALIFA et al., 2000).

As microfissuras na zona de transição contribuem na diminuição da resistência à flexão, além do módulo de elasticidade do concreto endurecido que, com o aumento da temperatura, diminui do seu valor inicial.

Devido ao uso da água para o combate ao incêndio, ocorre um resfriamento rápido que gera uma reidratação destrutiva da cal, pelo fato de que o óxido de cálcio, quando ligado à água, passa a ter uma expansão abrupta, o que pode provocar danos adicionais ao concreto endurecido, provocando a desagregação após o incêndio (COSTA et al., 2002).

2.2.3 Agregados

Por constituírem cerca de 70% do concreto, os agregados podem ser destrutivos para ele, dependendo de suas taxas de aquecimento e seus tamanhos. Com o acréscimo do volume por conta de sua expansão térmica, produzem *pop outs* (pipocamentos), e *spalling* (lascamentos) no concreto (COSTA et al., 2002).

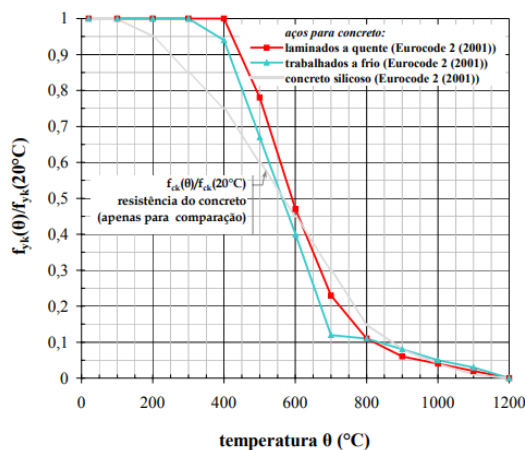
As tensões térmicas dentro do concreto, sujeitado à temperatura elevada, são produzidas na interface do agregado graúdo, por conta da diferença de dilatações térmicas entre a argamassa e o próprio material. As suas intensidades são influenciadas pela forma geométrica e arranjo dos agregados (COSTA et al., 2002), e, com isso, as microfissuras surgem e se alastram, enfraquecendo o concreto. Segundo o autor, essas fissuras podem ser controladas com a aplicação de agregados de menor coeficiente de expansão térmica.

2.2.4 Aço

A temperatura que anula completamente a resistência do aço é 1200°C, sendo sua fusão aos 1550°C aproximadamente. Porém, os incêndios normalmente aproximam-se dos 1200°C (FERREIRA, 1988). O módulo de elasticidade do aço é influenciado pela natureza do aço e tensões residuais, assim, conforme a temperatura aumenta, a sua taxa de redução é maior do que a da resistência (COSTA et al., 2002). As Figuras 2(a) e 2(b) apresentam a redução da resistência e do

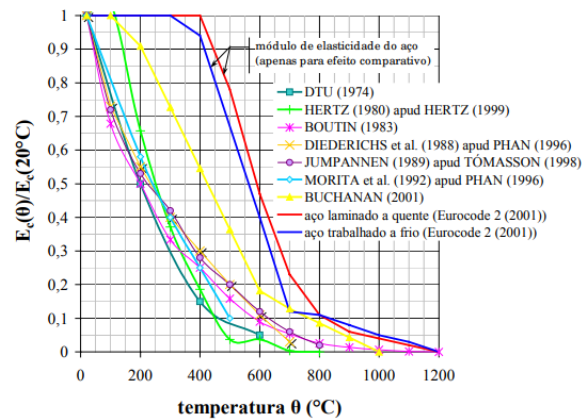
módulo de elasticidade dos aços utilizados nas estruturas de concreto armado e do próprio concreto endurecido, quando submetidos a altas temperaturas.

Figura 2(a) – Redução da resistência dos aços para concreto armado e do próprio concreto.



Fonte: COSTA *et al.*, 2002.

Figura 2(b) – Redução do módulo de elasticidade dos aços para concreto armado e do próprio concreto.



Fonte: COSTA *et al.*, 2002.

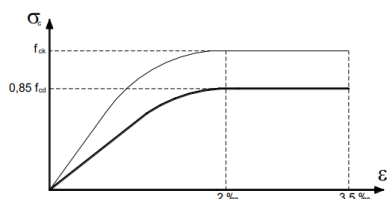
2.3 COMPORTAMENTO DO CONCRETO ARMADO

2.3.1 Estado limite último

A NBR 6118 (ABNT, 2014) relaciona o estado limite último ao colapso, ou a qualquer outra forma de ruína estrutural, que determine a paralisação do uso da estrutura.

A distribuição de tensões no concreto se faz de acordo com o item 17.2.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014), o qual indica o diagrama tensão-deformação à compressão, em função da classe do concreto, definido com tensão de pico igual a $0,85 \cdot f_{cd}$, para que seja feito o dimensionamento de seções transversais de peças de concreto armado, como indicado na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama tensão-deformação à compressão para concretos até C50.



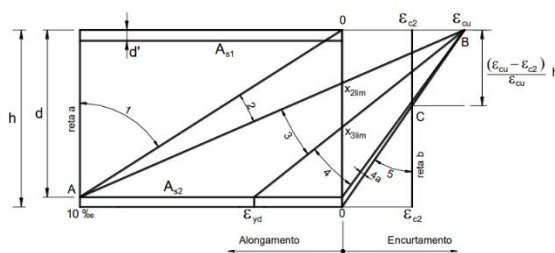
Fonte: NBR 6118, 2014.

A norma cita que o estado limite último é caracterizado quando a distribuição das deformações na seção transversal pertence a um dos domínios definidos na Figura 4.

Nas vigas, deve ser analisada a relação entre a posição da linha neutra e a altura útil (x/d), para que se garanta os limites e, com isso, boa ductibilidade, sendo adotada, se necessário, armadura de compressão que garanta a posição adequada da linha neutra (x), respeitando-se os limites impostos (NBR 6118, ABNT 2014).

A introdução da armadura de compressão para ajustar a linha neutra (x) em valores menores, que estejam nos domínios 2 ou 3, não conduz a elementos estruturais com ruptura frágil (usualmente chamados de superarmados), a qual está associada a posições da linha neutra no domínio 4, com ou sem armadura de compressão (NBR 6118, ABNT 2014).

Figura 4 – Diagrama possíveis domínios de deformações.



Fonte: NBR 6118, 2014.

A armadura mínima de tração, em elementos estruturais armados, deve ser determinada pelo dimensionamento da seção a um momento fletor mínimo, respeitada a taxa mínima absoluta de armadura de 0,15%, conforme consta na tabela 17.3 da referida norma. A NBR 6118 (ABNT, 2014) define o espaçamento das barras, que deve ser respeitado.

2.4 COMPORTAMENTO DO CONCRETO ARMADO COM FIBRA DE VIDRO

2.4.1 Estado limite último

A ACI 440 (2015) define que a resistência à tração das barras de FRP deve ser calculada pela média dos ensaios realizados, geralmente pelo fabricante, ou o valor médio obtido experimentalmente em corpos de prova ensaiados.

Se bem ancoradas, as barras de FRP retêm a resistência e rigidez consideráveis em temperaturas bem acima de T_g , caso o comprimento de ancoragem permaneça fora da área de alta temperatura no decorrer do incêndio, já que a perda de aderência na zona aquecida é menos crítica, pois as próprias fibras são menos sensíveis à temperatura elevada (ACI 440.1R-15).

Com isso, Robert e Benmokrane (2010) apresentaram que barras GFRP bem ancoradas, com T_g de 250°F (120°C), retinham até 50% de sua resistência à tração em temperaturas superiores a 570°F (300°C) (ACI 440.1R-15).

A norma também recomenda que as estruturas tenham um coeficiente de segurança maior do que o usado em estruturas armadas com aço, a fim de compensar o comportamento frágil e possibilitar uma resistência de projeto superior à estrutura, já que a resistência à compressão é menor comparada à de tração, sendo ignoradas em cálculos de projeto, devendo ser assumido o valor da deformação máxima de compressão em concreto em 3‰.

Na Tabela 6.2 do ACI 440.1R (2015), consta-se os valores do fator ambiental de redução das propriedades dos materiais estabelecidos, cujas resistências são minoradas por esses coeficientes, de acordo com a condição de exposição do elemento e tipo de fibra.

Como o comportamento das barras de FRP é elástico, linear e frágil até a ruptura, são utilizados os parâmetros de taxa de armadura de FRP do elemento, e a taxa de armadura balanceada (taxa de armadura para a qual ocorrem, simultaneamente, ruptura do FRP e esmagamento do concreto) (MAZZÚ et al., 2020). Com isso, a taxa de armadura longitudinal FRP deve ser superior à taxa de armadura balanceada, que é calculada usando a resistência à tração do projeto, pela inexistência do escoamento, e armadura mínima deve ser calculada apenas se a situação de ruína do elemento for governada pela ruptura da barra de FRP (ACI 440, 2015).

3 METODOLOGIA

3.1 TIPO DE ESTUDO E LOCAL DA PESQUISA

Tratou-se de uma pesquisa experimental, de caráter laboratorial, com análise comportamental de vigas de concreto armado com barras poliméricas submetidos a altas temperaturas.

A pesquisa realizou-se pelo método investigativo, seguindo determinados procedimentos para obtenção dos dados necessários à elaboração da pesquisa.

Com base nisso, tendo definido os objetivos do estudo para o desenvolvimento deste trabalho, tornou-se possível estabelecer o procedimento metodológico, que foi desenvolvido em diferentes etapas, sendo elas: materiais utilizados, produção do concreto e métodos de ensaios.

Todo procedimento experimental foi desenvolvido nas dependências do laboratório do Centro Universitário Assis Gurgacz.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

O estudo investigativo foi realizado com ensaios de compressão axial e tração na flexão. A quantidade de amostras é um parâmetro influente na interpretação dos resultados para que tenha a menor variabilidade de valores.

Para a caracterização da resistência à compressão do concreto com temperatura ambiente, foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos com 10cm de diâmetro e 20cm de altura, conforme NBR 5739 (ABNT, 2018). Para o ensaio de tração na flexão, foram moldados 8 corpos de prova prismáticos com dimensões 15x20x25cm, sendo duas amostras para o aço estrutural, e duas para a fibra de vidro em temperatura ambiente que serviram de parâmetro de comparação para as demais amostras; duas para o concreto armado com aço estrutural, e duas para o concreto armado com barras de fibra de vidro GFRP, conforme NBR 12412 (ABNT, 2010), que foram submetidos a uma temperatura padrão de incêndio e resfriamento brusco. Os ensaios foram realizados após as amostras serem submetidas à temperatura de simulação de incêndio, 1000°C.

Dessa forma, totalizou-se 11 amostras que apresentaram a resistência característica determinada, sob ensaios de compressão axial e flexão, respectivamente. Todas as amostras foram submetidas à cura úmida, e ensaios realizados aos 28 dias.

3.3 INSTRUMENTOS E PROCEDIMENTOS PARA COLETA DE DADOS

3.3.1 Delimitação e estruturação do estudo

Um dos preceitos do presente trabalho, foi a análise do comportamento à compressão axial e à flexão de corpos de prova cilíndricos e prismáticos de concreto com barras de aço e barras de GFRP, quando estes são aquecidos à determinada temperatura, além de averiguar o estado limite último. Dessa forma, fez-se necessária uma análise experimental em laboratório que seguiu um corpo de regras e diligências preestabelecidas.

3.3.1.1 Critérios

Para fins de cálculo, utilizou-se:

- Concreto C30 (CAA II – ambiente urbano);
- Barras de GFRP do fabricante *Composite Group* (informações técnicas no Quadro 1 abaixo);
- Brita 1 (19 mm);
- Coeficiente de ponderação da resistência do concreto no estado-limite último: 1,4, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014);
- Coeficiente de ponderação da resistência do aço no estado-limite último: 1,15, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014);
- Fator de redução ambiental para a barra de GFRP com concreto exposto à terra e às intempéries: 0,7, segundo a ACI 440 (2015).

Os Quadros 1 e 2 apresentam as informações técnicas das barras de GFRP e de aço convencional, respectivamente.

Quadro 1 – Informações técnicas médias das barras de GFRP retiradas de ensaios laboratoriais realizados por *St. Petersburg State Transport University Testing Laboratory* para o fabricante *Composite Group*.

Diâmetro da barra (mm)	Diâmetro nominal (mm)	Área nominal (mm ²)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
------------------------	-----------------------	---------------------------------	----------------------------	------------------------------

6,0	6,4	32,15	1089,58	50,74
8,0	8,02	50,49	1083,56	50,58
10,0	10,02	78,81	1023,97	51,41

Fonte: Autora, 2022.

Quadro 2 – Informações técnicas das barras de CA-50.

Diâmetro da barra (mm)	Diâmetro nominal (mm)	Área (mm²)	Escoamento (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
6,0	6,35	31	500	210
8,0	7,94	50		
10	9,53	80		
12,5	12,70	125		
16,0	15,88	200		

Fonte: Autora, 2022.

Diante dessas considerações e tendo por objetivo a execução de um concreto específico para ensaio, serão discriminadas, na sequência, as propriedades e características consideradas para o estudo.

3.3.2 Dimensionamento de viga armada com GFRP

O dimensionamento foi realizado conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), seguindo recomendações da norma ACI 440 (2015) sobre os parâmetros do material. A ruína foi calculada pelo esmagamento do concreto, sendo calculada armadura de tração e de compressão mínimas por flexão simples.

3.3.3 Viga armada com aço convencional pela NBR 6118

A NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece o método de dimensionamento de estruturas de concreto armado no Brasil, como lajes, vigas, pilares entre outros.

A armadura mínima foi calculada (em cm²), como uma taxa da área da seção transversal da viga (Equação 1), com os parâmetros das taxas mínimas de armadura de flexão.

$$A_{s,min} = \rho_{min} * b_w * h \quad (1)$$

sendo:

$A_{s,min}$: Armadura mínima (cm²);

ρ_{min} : Parâmetro de taxa mínima de armadura de flexão;

b_w : Largura da viga (cm);

h : Altura da viga (cm).

3.3.4 Traço do concreto

O traço utilizado na pesquisa para a produção dos concretos foi de 1:2:3 e relação água/cimento de 0,5. A composição do traço do concreto de cimento *Portland* de referência foi estabelecida de maneira a atender a resistência de 25 MPa aos 28 dias.

O aglomerante empregado foi o cimento CP II-Z-32, atendendo às exigências da NBR 11578 (ABNT, 1991). Para o agregado miúdo, utilizou-se a areia natural, classificada como areia média. Já o agregado graúdo foi de origem basáltica, com dimensão característica de 19mm e classificado como brita 01.

Para quantificar o material para a produção do concreto, deve-se possuir a quantidade total de corpos de prova, 11 unidades, e o traço do concreto para obter um metro cúbico de concreto, 300:600:900:150, os quais estão em quilogramas. O corpo cilíndrico constava 10cm de diâmetro e 20cm de altura conforme NBR 5738 (ABNT, 2008), apresentando um volume de 1,57 litros. Em contrapartida, o corpo prismático possuía 15x20x25cm, conforme dimensões da forma fabricada em madeira pela autora, totalizando um volume de 7,5 litros.

Considerando que serão 3 amostras de 1,57 litros e 8 amostras de 0,0075m³, ou seja, 60 litros, é previsto, então, um volume aproximado de 64,71 litros de concreto, porém, deverá ser considerada as perdas e, para que seja evitada a falta de materiais na execução, serão produzidos 90 litros, ou então 0,0090m³.

3. Dessa forma, estimou-se o consumo dos materiais compostos no concreto conforme o Quadro

Quadro 3 – Proporcionalamento dos materiais

Material	Quantidade	Unidade medida
Cimento Portland	27	Kg
Areia média	54	Kg
Brita 1	81	Kg
Água	13,50	Litros

Fonte: Autora, 2022.

3.3.5 Preparo e montagem das armaduras

O preparo e montagem das armaduras atenderam ao que estabelece a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Os cortes das barras da armadura satisfizeram as tolerâncias estabelecidas no item 9.2.4 da NBR 14931 (ABNT, 2004), assim como o dobramento das barras, inclusive ganchos, respeitando os diâmetros internos de curvatura do item 8.1.5.3 da referida norma, sendo dobradas a frio. Além disso, seguiu-se o critério adotado por ela, no quesito da aceitação de emendas de barra de aço.

A armadura foi posicionada e fixada no interior das fôrmas de acordo com as especificações, seguindo as tolerâncias também estabelecidas em 9.2.4. A montagem da armadura fez-se por amarração, utilizando arames.

O cobrimento especificado para a armadura no projeto foi mantido por espaçadores e sempre se referindo à armadura mais exposta, conforme solicita a norma especificada.

3.3.6 Preparo do concreto

A mistura de concreto foi realizada com o auxílio de uma betoneira de eixo inclinado, a qual seguiu a ordem de colocação: 100% do agregado graúdo, 50% da água de amassamento, 100% de cimento, 100% do agregado miúdo e 50% da água de amassamento.

Após a colocação de todo material, o concreto foi misturado por aproximadamente cinco minutos. Ao finalizar o processo de mistura, realizou-se o controle da consistência do concreto, conforme determina a NBR NM 67 (ABNT, 2004), atingindo um *slump test* de 12cm, atendendo a referida norma.

A moldagem dos corpos de prova realizou-se após o processo de mistura, seguindo as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2008).

Após a realização da concretagem e adensamento, os corpos de prova foram mantidos em ambiente de laboratório por vinte e quatro horas. Após esse período, foram desmoldados e submetidos à cura em uma câmara úmida com umidade e temperatura controlada ($UR \geq 95\%$ e temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$), onde ficaram armazenados até os vinte e oito dias, idade da realização dos ensaios.

Após o desmolde, foram identificados como “TA-28-09/09; CTA-28-09/09; AB-28-09/09; FB-28-09/09; AT-28-09/09; FT-28-09/09; CAB-28-09/09; CFB-28-09/09; CAT-28-09/09; CFAT-28-09/09”, sendo que:

- TA: temperatura ambiente;
- 28: idade de vinte e oito dias;
- CTA: contraprova temperatura ambiente;
- AB: aço ao resfriamento brusco;
- FB: fibra ao resfriamento brusco;
- AT: aço à temperatura ambiente;
- CFAT: contraprova fibra à temperatura ambiente;
- CFB: contraprova fibra ao resfriamento brusco;
- CAT: contraprova aço à temperatura ambiente;
- CAB: contraprova aço ao resfriamento brusco.

3.3.7 Tempo de exposição à altas temperaturas

No quesito da duração da exposição das amostras a altas temperaturas, para o aço, o tempo para atingir a temperatura desejada de 1000°C foi de 3h45min. Em contrapartida, para a fibra de vidro

o tempo foi de 4h10min para atingir a mesma temperatura. Em função da capacidade da mufla, as amostras prismáticas foram testadas em dupla. Após estabilizar na temperatura desejada, as amostras foram retiradas após 15min.

As amostras foram aquecidas no forno mufla, com o objetivo de simular uma situação de incêndio na estrutura de concreto. Todos os ensaios de altas temperaturas realizaram-se após se passarem 28 dias do preparo do concreto.

3.3.8 Modo de resfriamento

Logo após chegarem à idade prevista, as amostras foram resfriadas de forma brusca, por meio de jatos de água, simulando a ação dos bombeiros perante tal situação.

Essa etapa foi cuidadosamente feita para que todos os corpos de prova fossem resfriados de forma igual – sem saturação –, para que não houvesse redução da resistência durante os ensaios de rompimento, representando resultados errôneos por descuido nesta etapa, não representando o que aconteceria em uma situação real.

3.3.9 Métodos de ensaios

3.3.9.1 Compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados conforme prescrições da NBR 5739 (ABNT, 2018), empregando a prensa computadorizada da marca *CONTENCO*, modelo I-3058, com capacidade de 100 toneladas. A resistência final foi a média aritmética das amostras ensaiadas.

3.3.9.2 Tração na flexão

O ensaio de tração realizou-se conforme especificações da NBR 12142 (ABNT, 2010), que indica o procedimento experimental para determinação da resistência à tração na flexão, empregando

a prensa computadorizada da marca *CONTENCO*, modelo I-3058, com capacidade para 100 toneladas. A resistência final foi a média aritmética das amostras ensaiadas.

3.3.10 Processo de registros

De modo a complementar os dados a serem coletados, foram feitos registros fotográficos sempre no mesmo ângulo e posicionamento da câmera para cada amostra, a fim de catalogar seus comportamentos quando expostos a tais cenários, com o propósito de registrar seus resultados em todas as faces, sendo elas duas das superfícies planas e duas da área lateral.

Posto isso, foram anexados às planilhas das suas referidas amostras identificadas, com seus respectivos resultados, após os ensaios na prensa hidráulica.

3.4 ANÁLISE DOS DADOS

A coleta de dados foi realizada após os ensaios de compressão axial e flexão, cujos resultados foram tabulados em planilha no programa *Excel*, e comparados entre os dois materiais para análise de seus comportamentos perante à situação em que se encontram.

Esses resultados foram apresentados por meio de relatórios segundo a NBR 5738 (ABNT, 2015) e NBR 12142 (ABNT, 2010), as quais solicitam algumas informações mínimas que devem conter em seus respectivos documentos, junto aos registros fotográficos.

4 ANÁLISES E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

Este ensaio tem como principal objetivo o controle tecnológico do concreto, a fim de garantir o desempenho da estrutura e impedir problema que possam interferir na vida útil do projeto. Com ele,

pode-se analisar parâmetros técnicos das amostras, identificando eventuais variações na qualidade e resistência, seja em relação à dosagem, seja quanto a seus insumos.

Para o estudo em questão, foram realizados os ensaios de compressão axial em três corpos de prova cilíndricos e chegaram-se aos resultados apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Resultados dos ensaios de compressão axial

CORPOS DE PROVA	IDADE (dias)	DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA (cm)		CARGA DE RUPTURA (kgf)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA (MPa)
		DIÂMETRO	ALTURA			
1	28	10	20	23730	29,6	29,2
2	28	10	19,5	23140	28,9	
3	28	10	20	23410	29,2	

Fonte: Autora, 2022.

Conforme o observado no Quadro 4, efetuou-se uma média aritmética com as três amostras para obtenção da resistência à compressão do concreto, chegando em aproximadamente 29 MPa aos 28 dias. A Figura 5 apresenta o corpo de prova rompido à compressão.

Figura 5 – Ruptura de corpos de prova submetidos à compressão axial.



Fonte: Autora, 2022.

4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE TRAÇÃO NA FLEXÃO

As resistências à tração do concreto são inferiores comparadas com as resistências à compressão, e a partir delas que há o controle de surgimento de possíveis fissuras. Segundo Rabello (2013), essas fissuras podem surgir tanto por tensões de origem térmica, como por retração na secagem, o que se torna fundamental para o controle da durabilidade da peça.

Dessa forma, realizou-se o ensaio de 8 corpos de prova prismáticos, obtendo resultados conforme apresentados nos Quadros 5 e 6, seguindo da NBR 12142 (ABNT, 2010).

Quadro 5 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão do aço e fibra de vidro sob cenário de incêndio e resfriamento brusco

TIPO	CORPOS DE PROVA	IDADE (dias)	VÃO ENTRE APOIOS (mm)	FORÇA (N)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)	RESISTÊNCIA MÉDIA À TRAÇÃO (MPa)
AÇO ESTRUTURAL	1	28	200	39325	0,8	0,7
	2	28		30008	0,6	
FIBRA DE VIDRO	1	28		27851	1,1	0,95
	2	28		18829	0,8	

Fonte: Autora, 2022.

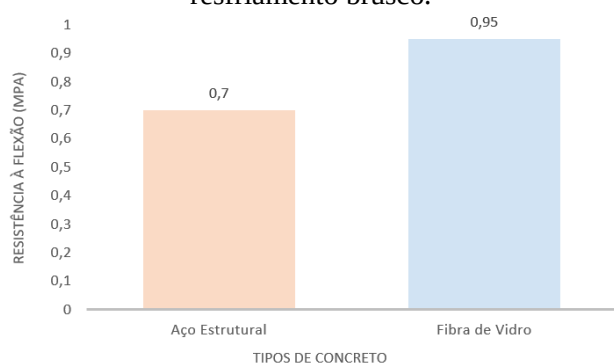
Quadro 6 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão do aço e fibra de vidro sob temperatura ambiente

TIPO	CORPOS DE PROVA	IDADE (dias)	VÃO ENTRE APOIOS (mm)	FORÇA (N)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)	RESISTÊNCIA MÉDIA À TRAÇÃO (MPa)
AÇO ESTRUTURAL	1	28	200	104833	2,1	2,0
	2	28		92771	1,9	
FIBRA DE VIDRO	1	28		99243	2,0	2,25
	2	28		127192	2,5	

Fonte: Autora, 2022.

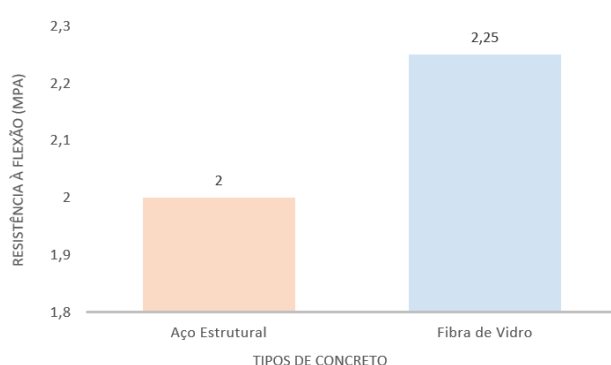
As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados médios do aço estrutural e da fibra de vidro submetidos a altas temperaturas e em temperatura ambiente, respectivamente.

Figura 6 – Resistência à tração na flexão do aço e fibra (GFRP) rompidas após ser submetida a 1000°C e resfriamento brusco.



Fonte: Autora, 2022.

Figura 7 - Resistência à tração na flexão do aço e fibra (GFRP) rompidas sob temperatura ambiente.



Fonte: Autora, 2022.

Conforme demonstra a Figura 6, observou-se que as amostras submetidas a altas temperaturas e resfriamento brusco também obtiveram acréscimo na resistência à flexão para as amostras com GFRP (fibra de vidro) em comparação ao aço estrutural, e esse acréscimo foi em média de 12%. Já em relação aos valores apresentados na Figura 7, que são referentes às amostras com GFRP (fibra de vidro), apresentaram uma resistência à flexão maior comparada ao aço estrutural, quando rompidos em temperatura ambiente, sendo superior em média 36%.

As Figuras 8, 9, 10 e 11 apresentam os corpos de prova rompidos à flexão.

Figura 8 – Ruptura do corpo de prova com aço estrutural após ensaio de tração na flexão sob temperatura ambiente



Fonte: Autora, 2022.

Figura 9 – Ruptura do corpo de prova com fibra de vidro após ensaio de tração na flexão sob temperatura ambiente



Fonte: Autora, 2022.

Figura 10 – Ruptura do corpo de prova com aço estrutural após ensaio de tração na flexão após ser submetida a 1000°C e resfriamento brusco



Fonte: Autora, 2022.

Figura 11 – Ruptura do corpo de prova com fibra de vidro após ensaio de tração na flexão após ser submetida a 1000°C e resfriamento brusco



Fonte: Autora, 2022.

Salienta-se que as amostras com GFRP foram rompidas no dia seguinte, após 13 horas do resfriamento, pelo fato de que seu interior estava muito quente, como se pode observar na Figura 12, o que se tornou perigoso para a realização do ensaio naquele momento. Quando foram rompidas, ainda mantiveram uma temperatura aproximada de 300°C. Além disso, quando foi aberto o forno para retirá-las, o material havia derretido. Pelo fato de não haver normas para o material, nem estudo do seu ponto de fusão, este cenário não poderia ser evitado, como mostra a Figura 13.

Figura 12 – Corpo de prova moldado com barras de GFRP após resfriamento brusco.



Fonte: Autora, 2022.

Figura 13 – Corpo de prova pronto para ser retirado do forno após atingir 1000°C.



Fonte: Autora, 2022.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo buscou fazer a análise comportamental de vigas de concreto armado com barras poliméricas submetidos a altas temperaturas, e, para tanto, foram moldados corpos de prova cilíndricos para o ensaio de compressão axial do concreto, e corpos de prova prismáticos para que fossem submetidos aos ensaios de tração à flexão.

Para os ensaios de compressão axial, o concreto atingiu uma resistência de aproximadamente 29 MPa, sendo acima da especificada em projeto, já que valor estimado para 28 dias era de 25 MPa, o qual foi ultrapassado conforme o traço feito pela autora e suas respectivas quantidades e qualidade do produto, garantindo mais segurança para a estrutura.

Nos ensaios de tração à flexão para as amostras rompidas sob temperatura ambiente, as médias aritméticas dos materiais tiveram uma diferença pequena, de 0,25 MPa, sendo que os prismas moldados com as barras de GFRP obtiveram um resultado maior, de 2,5 MPa, do que a do aço, que chegou em 2 MPa.

Para os modelos submetidos à uma temperatura de 1000°C, cada material reagiu de forma diferente. Para o aço, os corpos de prova demoraram 3h45min para atingir a temperatura desejada, em contrapartida, as com barras de GFRP demoraram 4h10min, e não puderam ser rompidas no mesmo dia do aquecimento e após o resfriamento brusco, já que o calor interno da amostra estava muito alto, como se pôde observar na Figura 12. Com isso, elas foram rompidas 13h depois do

resfriamento, para a segurança da autora, e ainda atingiram uma resistência maior que a do aço, sendo 0,95 MPa e 0,7 MPa, respectivamente.

Dessa maneira, conclui-se que o material possui uma boa resistência quando submetido à tração, porém não se pode garantir a temperatura máxima que a estrutura resiste ao fogo, já que não possui estudos nem normas do seu comportamento perante tal cenário.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. COMMITTEE 318. **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)**. Detroit, 2019.

_____. **ACI COMMITTEE 440.1R**. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. 2015.

_____. **ACI COMMITTEE 440.2R**. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738** – Moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **NBR 6118** – Estruturas de concreto armado – procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014

_____. **NBR 6120** – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT 2019.

_____. **NBR 11578**: Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

_____. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 14931:** Execução de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 15200** – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR NM 67** – Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

COMPOSITE GROUP. **Vergalhões de fibra de vidro: Conheça obras que podem utilizá-los.** 2021. Disponível em: <<https://compositegroup.com.br/blog/vergalhoes-de-fibra-de-vidro-conheca-obras-que-podem-utiliza-los/>>. Acesso em: 24 mar. 2022.

COMPOSITE GROUP. **Diferenças entre aço e fibra de vidro.** 2020. Disponível em: <<https://compositegroup.com.br/blog/diferencas-aco-fibra-de-vidro/>>. Acesso em: 24 mar. 2022.

COMPOSITE GROUP. **O que é fibra de vidro?.** 2020. Disponível em: <<https://compositegroup.com.br/blog/o-que-e-fibra-de-vidro/>>. Acesso em: 20 mar. 2022.

COMPOSITE GROUP. **Vantagens em relação ao vergalhão de aço.** 2020. Disponível em: <<https://compositegroup.com.br/vantagens/>>. Acesso em: 20 mar. 2022.

COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A. D.; SILVA, V. P. **Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas.** Anais.. São Paulo: Universidade de São Paulo - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - Departamento de Tecnologia da Arquitetura, 2002.

EMPEROR ALEXANDER I ST. PETERSBURG STATE TRANSPORT UNIVERSITY TESTING LABORATORY. **Test Certificate No. 566/7144/1:** Measurements made for: composite reinforcement bar $\phi 6$, $\phi 8$, $\phi 10$ mm. Testing laboratory for test results Professor Beleyubsky Mechanical Laboratory, St. Petersburg, Russia, 2019.

FARINA, D. T. **Análise experimental das características físicas e mecânicas de concretos submetidos à altas temperaturas.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – PR, 2019.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Fib Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures.** Technical report by task group 9.3 FRP reinforcement for concrete structures, Lausanne, Switzerland, 2007.

FERREIRA, S. G. **Ação do Incêndio nas Estruturas de Aço — consequências e recuperação.** In: Simpósio Nacional de Arquitetura e Proteção Contra Incêndios. Anais. EPUSP. São Paulo, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834**: fire resistance tests: elements of building construction: part 3. General requirements. Geneva, 1994.

JACOMINI, G. M. **Avaliação da capacidade resistente de vigas de concreto armado reforçado com fibras utilizando os procedimentos normativos da ABNT NBR 16935:2021**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos – SP, 2021.

KALIFA, P.; MENNETEAU, F-D.; QUENARD, D. **Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures**. *Cement and Concrete Research*, N° 30. Elsevier Science Ltd. Amsterdam, 2000.

KAMAL, A. S.; BOULFIZA, A. M. **Durability of GFRP rebars in simulated concrete solutions under accelerated aging conditions**. *Journal of composites for construction*, v. 15. 2011.

MAZZÚ, A. D. E.; DALFRÉ, G. M.; FERREIRA, F. G. S. **Dimensionamento de vigas de concreto armadas à flexão com barras não metálicas**. In: *Concreto & Construções*. Universidade Federal de São Carlos. 98. ed. p. 72-78. abr/jun, 2020.

MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGANELLO, A. M. P. **A ação do fogo sobre os componentes do concreto**. In: *Seminário de Ciências Exatas e Tecnológicas*, Londrina, v. 32, n. 1, p. 47-55, jan./mar. 2011.

MORAIS, E. H. **Comparação do dimensionamento de vigas de concreto armado e vigas reforçadas com barras de GFRP**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – PR, 2020.

OLIVEIRA, G. H.; GUIMARÃES, V. A.; BOTELHO, E. C. **Influência da temperatura no desempenho mecânico de compósitos de PEI/fibras de vidro**. Artigo técnico científico: Departamento de Materiais e Tecnologia, UNESP. São Paulo, 2009.

PACHECO, J.; BILESKY, P.; MORAIS, T. R.; GRANDO, F.; HELENE, P. **Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto**. In: *56º Congresso Brasileiro do Concreto*. Anais. IBRACON. São Paulo, 2014.

ROBERT, M.; BENMOKRANE, B. **Combined effects of saline solution and moist concrete on long-term durability of GFRP reinforcing bars**. *Construction and building materials*, Vol. 38. 2010.

SILVA, V. P. **Estruturas de Aço em Situação de Incêndio**, Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica (PEF). São Paulo. 1997c;