A SEGURANÇA DAS OBRAS NO BRASIL DISCUTIDA SOB DIFERENTES PONTOS DE VISTA. TRAGA O SEU.
1º CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES
21 a 23 de maio de 2014 - Foz do Iguaçu - PR

ESTUDO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DO REFORÇO COM FIBRA DE CARBONO EM CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS EM CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO BIAPOIADO

Hendges, M[1], Medeiros, M. H. F.[2]

[1] Universidade Federal do Paraná, Estudante, e-mail: marcelohendges@gmail.com
[2] Universidade Federal do Paraná, Professor, Doutor, e-mail: medeiros.ufpr@gmail.com

RESUMO

O estudo busca comparar o comportamento de uma peça de concreto biapoiada com e sem aplicação de reforço de fibra de carbono na parte inferior (zona de tração), com o intuito de resistir à flexão causada pelo momento fletor e o esforço cortante nos corpos de prova. Também objetiva-se observar a viabilidade da aplicação de uma ou duas camadas de fibra e a manutenção da integridade do reforço após aplicação de temperaturas mais altas que a ambiente. A fixação da camada de fibra foi feita por meio de resina epóxi formando um compósito monolítico. Obteve-se a temperatura variável expondo os corpos de prova a 40, 60 e 90°C por 3 horas em estufa. O rompimento usou uma configuração de viga biapoiada conhecida como Ensaio de Stuttgart. Os resultados indicam a grande eficiência da fibra na elevação da resistência mecânica do reforço com fibras de carbono, mas não foi confirmada a viabilidade da aplicação de duas camadas. Quanto à temperatura, comparando corpos de prova com uma camada de fibra, a exposição a 90°C gerou um decréscimo de resistência significativo e com isso sua utilização em temperaturas elevadas não é garantida.

Palavras chave: Fibra de Carbono; Reforço Estrutural; Materiais de Construção Civil; Compósito monolítico.

ABSTRACT

This study seeks to compare the behavior of a concrete beam with two supports with and without a carbon fiber reinforcement on the inferior area (tensile zone), with the intention of resisting to the bending caused by the bending moment and the shear on the specimens. Also, the research look for analyze the viability of using one or two sheets of carbon fiber and the maintenance of the integrity of the reinforcement after being exposed to temperatures higher than the ambient. The fastening of the fiber sheet was made by an epoxy resin, forming a monolithic composite. The variable temperature was obtained by exposing the specimens to 40, 60 and 90°C for 3 hours in a drying oven. The rupture used a beam configuration with two supports known as Stuttgart Test. The results indicate a great efficiency of the fiber on raising the mechanic resistance of the reinforcement with carbon fiber, but the viability of applying two sheets was not confirmed. About the temperature, comparing specimens with one sheet of fiber, the exposition to 90°C generated a significant decrease on the resistance, so its utilization with high temperatures is not guaranteed.

Keywords: Carbon Fiber; Structural Reinforcement; Civil Construction Materials; Monolithic Composites

1. INTRODUÇÃO

Existem inúmeras razões para a necessidade de reforçar estruturas, sendo a maioria delas ligadas ao contínuo processo de degradação que as edificações sofrem com o passar do tempo, afetando a integridade física, química e mecânica da estrutura. Por outro lado, quando existe alguma alteração na utilização da estrutura, criando a necessidade do aumento da capacidade portante, o reforço estrutural aparece como solução alternativa.

Neste campo, algumas características da fibra de carbono se destacam perante outras formas de reforço estrutural (fibras de vidro e aramida, chapas metálicas, estruturas auxiliares, etc), fazendo dela uma alternativa eficiente e de grande utilidade em diversos casos. Sua grande resistência à tração, elevado módulo de elasticidade longitudinal, dimensões e peso reduzido, alta resistência à maioria dos produtos químicos, estabilidade dimensional e facilidade de aplicação, conferem a ela grandes vantagens para seu emprego na construção civil. As aplicações são geralmente nas zonas de tração de peças estruturais como vigas e lajes, ou de forma confinante, quando a peça é evolvida pela fibra, impedindo sua flexão.

A aplicação associa a fibra de carbono, em forma de manta, e uma matriz polimérica, geralmente sendo uma resina epóxi termofixa. Os dois componentes tendem a ligar-se formando um compósito monolítico aderido a superfície da estrutura. As propriedades mecânicas do compósito provêm inteiramente das características da fibra e de sua interface com a matriz polimérica, a qual é diretamente afetada pelas condições do ambiente exposto. Por isso, faz-se necessária a matriz possuir características como alta estabilidade dimensional em temperaturas elevadas, baixa absorção de água, alta resistência química e mecânica, entre outras (HOLLOWAY, 2010). Segundo a IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), um polímero termofixo pode ser sólido ou viscoso, modificado irreversivelmente em uma rede polimérica infusível e insolúvel. Neste conceito, a variação de temperatura acima de certo limite acaba por decompô-lo, diminuindo drasticamente suas propriedades. Por isso, sendo o epóxi usado como cola da fibra de carbono um polímero termofixo, existe a necessidade da análise das condições de temperatura a qual a estrutura reforçada pode ser exposta, avaliando a garantia da integridade do sistema de reforço com fibra de carbono mesmo em situações atípicas.

Neste contexto, a utilização da fibra de carbono foi sendo aperfeiçoada ao longo dos anos. O início do desenvolvimento da técnica se deu principalmente no Japão em meados dos anos 1950 do século passado, em decorrência da constante incidência de abalos sísmicos na região, os quais acabavam por danificar as estruturas gerando a necessidade de restaurar as condições estruturais de resistência inicial. No Brasil, o emprego da fibra foi iniciado nos anos 1990, ainda de maneira pouco significante, porém observou-se um crescimento do uso na última década. O setor de infraestrutura de transportes, por exemplo, necessita de urgente

reabilitação. As estruturas construídas no período de grandes investimentos do governo de Juscelino Kubitscheck e da ditadura militar não compreendem os atuais carregamentos, superando as resistências de projeto iniciais colocando em risco a operação nestas estruturas. Outro exemplo são as construções históricas que necessitam de reparo, mas precisam preservar as características que a tornam única e diferenciada, não alterando seu aspecto geométrico e construtivo. Nas situações apresentadas, a fibra de carbono entra como possível solução, de forma rápida e eficaz a fim de restaurar ou aumentar a capacidade da edificação.

A combinação de propriedades da fibra de carbono e do polímero é essencial para a utilização desses compósitos na indústria da construção civil, onde a falha da estrutura não pode ser admitida, buscando sempre a durabilidade máxima da edificação. **-**

2. OBJETIVOS

O estudo foi dividido em três objetivos básicos:

1) Comparar a resistência à flexão, com e sem aplicação da fibra de carbono em corpos de prova prismáticos, a partir de corpos de prova de referência rompidos, buscando verificar o acréscimo de resistência gerado pela fibra e comprovando sua eficácia.

2) Verificar a variação e viabilidade entre a aplicação de uma e duas camadas de fibra:

3) Expor os corpos de prova a temperaturas elevadas, simulando situações ambiente e/ou extremas, verificando a manutenção da integridade do reforço:

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais e confecção dos corpos de prova (mini-vigas)

As mini-vigas de concreto foram moldadas em fôrmas metálicas e tiveram dimensões de 305x56,3x25,4mm. O concreto foi misturado em uma argamassadeira convencional em dois períodos de 2 minutos, separados pelo tempo necessário para revirar o material do fundo da cuba misturando com todo o material. A concretagem do corpo de prova se deu em duas camadas, cada uma compactada por 30 golpes padronizados com um soquete padrão de metal. A superfície foi regularizada manualmente e aplicado um plástico filme até a desmoldagem, a qual ocorreu 24 horas depois da moldagem. Os corpos de prova foram mantidos submersos em uma solução de água e cal por 28 dias para a cura do concreto, e suas características estão descritas a seguir:

Tabela 1 – Características do Concreto

Traço: 1 : 2,2 : 3
Relação Água/Cimento: 0,6
Cimento CPII F-32
Brita zero
Areia fina, natural, seca em estufa

Foi utilizada uma fibra de carbono em forma de manta do modelo SikaWrap – 300 C/60, da marca Sika. A Tabela 2 apresenta as especificações técnicas do fabricante.

Tabela 2 – Características da Fibra de Carbono

Gramatura	300 g/m² ± 15 g/m²
Espessura do Tecido	0,166 mm
Densidade da Fibra	1,79 g/cm³
Resistência a Tração	3900 N/mm²
Módulo de Elasticidade	230000 N/mm²
Alongamento na Ruptura	1,50%

A resina utilizada também foi da marca Sika, modelo Sikadur 330. Adesivo epóxi bi-componente com dosagem 1:4, atendendo os requisitos normativos SOCOTEC (França) e do *Road and Bridges Research Institute* (Polônia). Na Tabela 3 estão dispostas as especificações técnicas disponibilizadas pelo fabricante:

Tabela 3 – Características da Resina Epóxi

Densidade	1,30 kg/l
Viscosidade (10°C)	10000 mPa.s
Viscosidade (23°C)	6000 mPa.s
Viscosidade (35°C)	5000 mPa.s
Coeficiente de Expansão Térmica	$4,5x10^{-5}x10\ °C^{-1}$
Temperatura de Serviço	-40°C a +45°C
Resistência de Tração	30 MPa (7 dias a +23°C)
Resistência de Aderência	Falha no concreto (> 4 MPa)
Módulo de Elasticidade na Flexão	3800 MPa (7 dias a +23°C)
Módulo de Elasticidade na Tração	4500 MPa (7 dias a +23°C)
Alongamento na Ruptura	0,9% (7 dias a +23°C)
Resistência Química	Produto não adequado para exposição a produtos químicos
Resistência Térmica	Exposição contínua: +45°C

Deve-se salientar que a ficha técnica do produto não informa a temperatura de transição vítrea do produto, mas cita que a temperatura máxima de trabalho, em exposição contínua da resina de colagem da fibra de carbono, é de 45 ^{o}C.

O método de aplicação da manta de fibra de carbono consistiu na aplicação do adesivo epóxi em camadas intercaladas com a fibra e posterior conformação da camada com um rolo a fim de tornar o compósito monolítico.

3.2 Ensaio de Stuttgart e análise do rompimento

Para a situação de rompimento foi utilizada a configuração denominada Ensaio de Stuttgart, muito comum no âmbito do concreto armado. É caracterizado pela aplicação de duas cargas concentradas iguais até o rompimento, sendo equidistantes dos apoios e gerando uma situação onde se pode observar na mesma viga casos de flexão pura (ausência de cisalhamento) e flexão simples (presença de cisalhamento), respectivamente apresentados nos trechos BC, e AB-CD, como indicado na Figura 1.

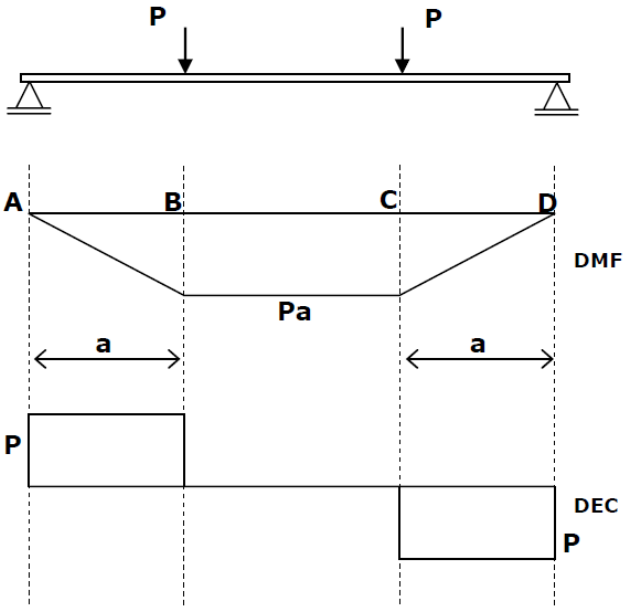

Figura 1 – Representação dos diagramas de momento fletor e esforço cortante do Ensaio de Stuttgart.

Fonte: ROCHA, et al, 2004, p. 2.

Esta configuração foi obtida em uma prensa hidráulica com velocidade de aplicação de carga de 7,5 kN/min especificada pelos pesquisadores de modo que o ensaio não demandasse grande quantidade tempo, nem que pudesse ser demasiado rápido impedindo o adequado acomodamento da peça após aplicação da carga. Foi suportada por dois apoios móveis distantes 244 mm entre si e 30,5 mm das extremidades, com cargas concentradas distantes 122 mm entre si e a 61 mm do apoio mais próximo. A carga foi aplicada em uma rótula e

posteriormente distribuída igualmente em dois roletes metálicos, conforme pode ser observado na Figura 2.



Figura 2 – Configuração de rompimento utilizada.

Esta configuração se mostra interessante na análise do rompimento dos corpos de prova. Sem a aplicação da fibra, o esforço de tração na parte inferior da viga é determinante para o rompimento pela fragilidade do concreto para esse esforço, ocorrendo grande fissuração e posterior rompimento na zona central. Já quando aplicada a fibra, a solicitação de tração é absorvida e o fator causador do rompimento é o cisalhamento na região de flexão simples de forma inclinada a 45°. As fissurações características dos esforços atuantes no ensaio de Stuttgart estão dispostas na Figura 3.

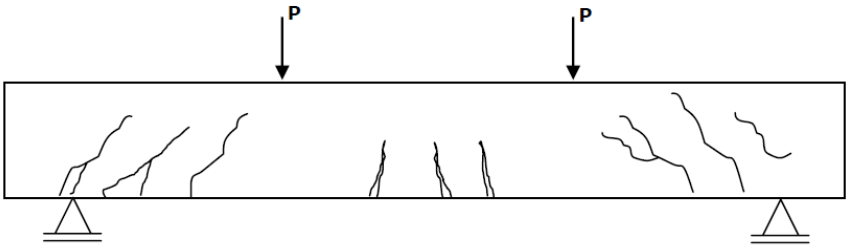

Figura 3 – Esquema de fissuração do corpo de prova.

Fonte: ROCHA, et al. 2004, p. 3.

A Figura 4 ilustra a ruptura típica de esforço de tração ocorrendo no terço médio. Este tipo de ruptura ocorreu no caso das mini-vigas sem reforço. A Figura 5 ilustra o tipo de ruptura por

cisalhamento (inclinada a 45°) nas proximidades aos apoios e ocorreu nas mini-vigas com o reforço por fibra de carbono.

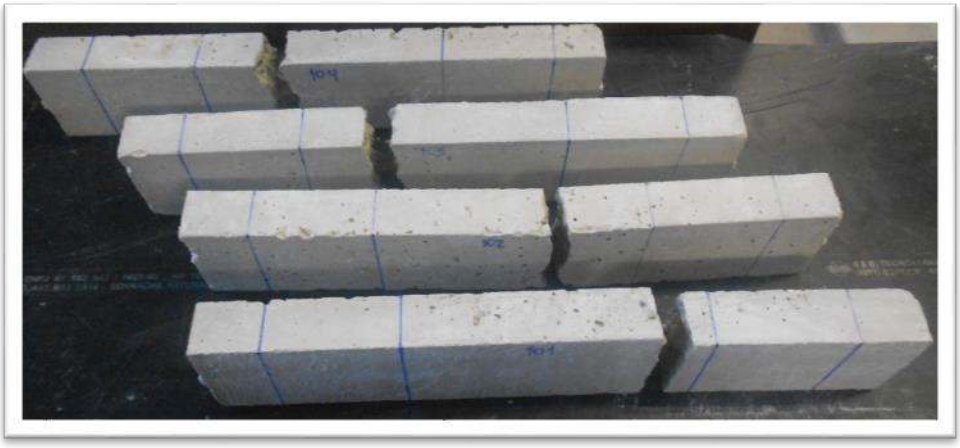

Figura 4 – Rompimento característico por tração (sem aplicação da fibra).



Figura 5 – Rompimento característico por cisalhamento (com aplicação da fibra).

Outro fato observado foi o descolamento do reforço pela solicitação de cisalhamento rompendo o concreto na superfície de contato, situação ocorrida em todos os corpos de prova com uma camada de reforço e constatada nos estudos de Toutanji, Zhao e Zhang (2005), Esfahani, Kianoush e Tajari (2007) e Sieber (2010). A temperatura não alterou a característica de rompimento, mas aplicando duas camadas o descolamento do compósito não foi total.

3.3Aplicação de temperaturas variáveis

Os corpos de prova com aplicação de uma camada de fibra de carbono foram submetidos à exposição em estufa por 3 horas a temperaturas de 40, 60 e 90°C, simulando situações ambientes normais e superiores, como no caso de ambientes industriais ou expostos a insolação intensa. O caso de 90°C simula a temperatura de transição vítrea (Tg) de resinas epoxídicas normalmente utilizadas em materiais compósitos (RELVAS, 2003, p. 5). A transição vítrea de polímeros termofixos é caracterizada pela temperatura acima da qual o material deixa de comportar-se como um sólido (estado quebradiço ou vítreo) e passa a

funcionar como um líquido (estado de borracha). Em temperaturas superiores ao Tg, o polímero começa a perder sua resistência até chegar à sua decomposição (HOLLOWAY, 2010, p. 2421).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram rompidos 24 corpos de prova, sendo quatro para cada variável de análise. A partir dos dados obtidos, foi possível chegar a resultados que atestam o grande aumento na resistência a flexão das mini-vigas. A investigação do acréscimo na resistência tomou por base corpos de prova referenciais, ou seja, sem aplicação do reforço com fibra de carbono, sendo estes capazes de resistir a carregamentos médios da ordem de 3,90 kN. O gráfico da Figura 6 indica as adições médias percentuais de resistência para cada caso observado de aplicação variável de camadas e temperaturas:

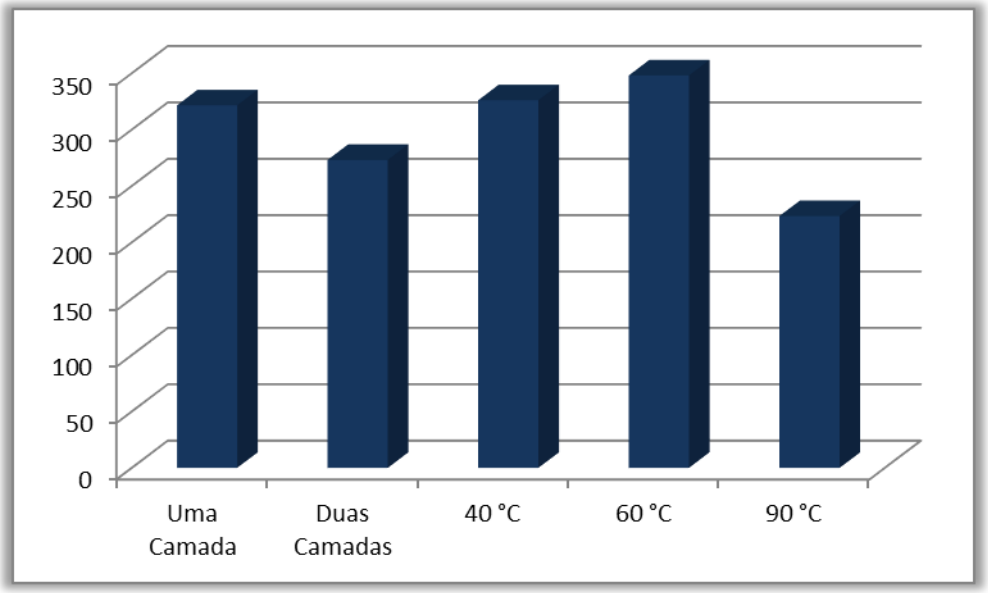

Figura 6 – Aumento percentual em relação ao referencial (sem reforço).

Os resultados obtidos constatam a grande elevação da resistência mecânica das peças, chegando a 321% (12,57 kN) para aplicação de uma camada em temperatura ambiente quando comparados ao referencial.

A aplicação de duas camadas atingiu o valor máximo (17,53 kN) de resistência registrado em um ensaio individual, o qual revelou um significante contraste quanto aos outros corpos de prova com duas camadas, ficando este valor fora do desvio padrão e consequentemente sendo descartado. Em decorrência da eliminação do valor que extrapolou o desvio padrão, o resultado encontrado indicou uma redução da capacidade de carga, gerando valor percentual de 273% (10,68 kN) quanto ao referencial, perfazendo apenas 85% da capacidade resultante dos ensaio com uma camada de reforço, como pode ser verificado no gráfico da Figura 7.

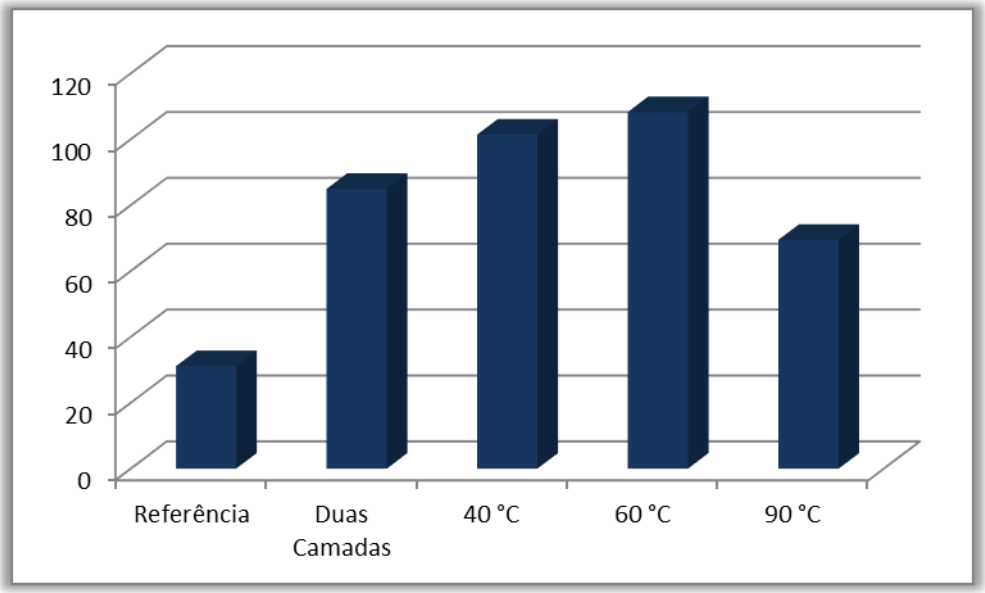

Figura 7 – Variação percentual em relação à aplicação de uma camada de fibra de carbono.

O Figura 7 também exprime o comportamento dos corpos de prova expostos a diferentes temperaturas. Nota-se que a 40 e 60°C a variação é pequena, 101 e 108% com relação a corpos de prova com uma camada de reforço, respectivamente. Isso indica que estes níveis de temperatura ainda não afetam a eficiência do reforço com fibra de carbono colada com resina epóxi. Já para o caso da temperatura de transição vítrea (90°C), a resistência cai para apenas 69% da observada a temperatura ambiente, evidenciando que a este patamar de temperatura o epóxi usado na colagem já começa a ser degradado (RELVAS, 2003, p. 5). Comparado ao estudo de Cunha, et al. (2006), onde corpos de prova de fibra de carbono em uma matriz polimérica epóxi foram ensaiados transversalmente (carga ortogonal ao sentido das fibras) após aquecimento à 80°C, observou-se que o polímero não mantém suas características iniciais de resistência quando exposto a temperaturas elevadas, tendo sua resistência reduzida em um ensaio onde o fator responsável pela resistência é a resina epóxi.

5. CONCLUSÃO

A utilização da fibra de carbono é indiscutivelmente vantajosa em diversos aspectos quando empregada em reforços estruturais de edificações. A partir do estudo realizado, foi possível observar um satisfatório incremento de resistência em corpos de prova com aplicação da fibra, triplicando a capacidade da mini-viga no ensaio de flexão.

Divergindo de outros estudos de natureza semelhante como o de Shahawy, et al. (1996) , a aplicação de duas camadas não conferiu ao corpo de prova resistência maior do que no caso da aplicação do reforço com uma camada. Vale salientar que o valor de máxima resistência

observado em todo o estudo ocorreu em uma mini-viga reforçada com duas camadas, porém, este valor foi descartado da análise porque os outros corpos de prova irmãos atingiram valores muito inferiores a ele, levando a crer que este valor máximo seja um dado espúrio. Experimentalmente, pode-se concluir que um acréscimo no reforço à flexão não aumenta a capacidade de uma viga de concreto quando seu rompimento característico se dá por cisalhamento.

A questão da aplicação de temperaturas variáveis acabou por tomar papel principal do estudo, pois traz novas informações pertinentes a manutenção da integridade do reforço, muito importantes na escolha do material para realização do reforço. Com base nos resultados obtidos, constatou-se a queda significativa da resistência para o caso da exposição a 90°C, reduzindo a capacidade a apenas 69% da série de referência com uma camada de fibra de carbono.

Deve-se previamente analisar o ambiente ao qual o reforço estará exposto, chaminés, ambientes industriais com máquinas a vapor ou geradoras de calor não são indicadas para receberem o reforço com fibra de carbono. Assim também, estruturas de concreto expostas ao sol intenso devem ser evitadas, pois estas podem alcançar temperaturas da ordem de 80°C, segundo Thomaz (1949), e assim representar um reforço que não será completamente efetivo. Vale também observar que o estudo considerou apenas uma exposição de 3 horas a cada temperatura pré-definida, não levando em conta o carregamento cíclico ao longo do tempo que as estruturas sofrem e que ocasionam um desgaste ainda maior do reforço.

6. REFERÊNCIAS

CUNHA, J. A. P.; COSTA, M. L.; REZENDE, M. C.. **Influência de Diferentes Condições Higrotérmicas na Resistência à Tração de Compósitos de Fibra de Carbono/Epóxi Modificada.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 16, n° 3, p. 193-201, 2006.

ESFAHANI, M. R.; KIANOUSH, M. R.; TAJARI, A. R.. **Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets.** Engineering Structures, v. 29 p. 2428-2444, 2007.

HOLLOWAY, L.C.. **A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their importante in-service properties.** Construction and Building Materials, v. 24, p. 2419-2445, 2010.

HORIE, K., et al.. **Definitions of terms relating to reactions of polymers and to functional polymeric materials.** Pure and Applied Chemistry, v. 76, p. 898. IUPAC, 2004

RELVAS, F. J.. **Reforço de vigas de concreto armado, a flexão, com fibra de carbono.** 2003. Disponível em : <http://www.exataweb.com.br/downloads/ABECE03_RELVAS.pdf> Acesso em: 16 jul. 2013.

ROCHA, A. C., et al.. Ensaios de Stuttgart – Reprodução em Laboratório, **46º Congresso Brasileiro do Concreto**. Florianópolis, IBRACON, 2004.

SIEBER, R.. **Debonding failure of CFRP reinforced concrete beams and in-situ monitoring schemes.** 2010. 43 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Massachussets Institute of Technology, 2010.

SHAHAWY, M. A. et al.. **Reinforced concrete rectangular beams strengthened with CFRP laminates.** Composites Part B: Engineering, v. 27, p. 225-233, 1996.

THOMAZ, E.. **Trincas em Edifícios.** Ed. IPT/EPUSP/PINI, 1949.

TOUTANJI, H.; ZHAO, L.; ZHANG, Y.. **Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded With an inorganic matrix.** Engeneering Structures, v. 28, p. 557-566, 2005.