

ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM LAMINADOS DE CFRP

Danilo Mascarenhas Prado¹ & Vladimir Guilherme Haach²

Resumo

O uso de CFRP (Compósitos Reforçados com Fibras de Carbono) como reforço em estruturas de concreto armado tem evoluído, principalmente com um novo método, o Near Surface Mounted (NSM) em que os laminados de fibra são inseridos ao concreto. Uma análise da eficiência dos reforços será realizada com o auxílio programa computacional DIANA®, em que serão modeladas vigas com diferentes resistências e hipóteses de reforço ao cisalhamento com laminados de CFRP. Os ensaios experimentais compreendem a ruptura mecânica pelo ensaio de flexão por três pontos e ensaios não destrutivos, permitindo assim um estudo do dano causado pelo pré-carregamento na rigidez dos elementos. Para os ensaios não destrutivos foram utilizados Acelerômetros piezoelétricos, ultrassom e um analisador de sinais dinâmico para ensaio de vibração Sonelastic®.

Palavras-chave: NSM. CFRP. Reforço ao cisalhamento. Análise modal.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENING TO SHEAR WITH FRP SHEETS

Abstract

The use of fiber reinforced polymer (FRP) in concrete structures has evolved, especially with a new method, the Near Surface Mounted (NSM) in the fiber laminates are inserted to the concrete. An analysis of the efficiency of the reinforcements will be performed using the software DIANA®. Beams will be modeled with different resistances and hypotheses of shear reinforcement with FRP laminates. Experimental tests include the mechanical rupture by bending test by three points and nondestructive testing, thus allowing a study of the damage caused by the preload in stiffness elements. For nondestructive testing were used Piezoelectric accelerometers, ultrasound and dynamic signal analyzer for vibration testing Sonelastic®.

Keywords: NSM. CFRP. Reinforced shear. Modal analysis

Linha de Pesquisa: Mecânica das Estruturas.

1 INTRODUÇÃO

O uso de materiais de elevado desempenho para a recuperação de estruturas proporcionou o desenvolvimento de novas técnicas de reforço. Um dos materiais mais utilizados como reforço de

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, danilomp@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, vghaach@sc.usp.br



estruturas de concreto é os Compósitos Reforçados com Fibras de Carbono (CFRP), principalmente por apresentarem altas resistências mecânicas e facilidade de aplicação junto ao concreto danificado.

Dentre o uso de CFRP existe uma técnica denominada Near Surface Mounted (NSM), essa técnica diferencia-se do uso comum do CFRP, pois nela chapas ou barras de CFRP são inseridas no concreto, preferencialmente na área de cobertura. As vantagens das hastes de CFRP com NSM comparados com os laminados de CFRP colados externamente são a possibilidade de ancorar o reforço no concreto adjacente e tempo de preparação da superfície e instalação do reforço. Dentro das pesquisas na comunidade científica encontra-se a Universidade de São Paulo (USP), especificamente a Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) que já desenvolve estudos com a técnica NSM em vigas para reforço à flexão como Arques (2010) e Fonseca (2007).

Dentre os programas acessíveis no mercado optou-se pelo uso do DIANA®, principalmente por este possuir distintos elementos finitos (elementos de viga, de estado plano de tensões, de estado plano de deformações, axissimétricos, de casca, sólidos, de interface, de mola, entre outros), diferentes formas de leis constitutivas para os materiais componentes de um sistema estrutural: elasticidade (linear, não linear), plasticidade (Tresca, Von Mises, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager), plasticidade ortotrópica (Hill, Hoffmann), visco plasticidade (Duvaut-Lions, Perzyna), interface não linear (dano discreto, dano por dilatação, “bond-slip”), entre outros. (Gamino, 2007).

Para o estudo da análise modal existem diversos métodos que utilizam a transformada de Fourier para transformar a resposta do tempo em frequência, desta forma podem-se obter as frequências naturais das estruturas. Os métodos mais comuns utilizam acelerômetros ou som para obter valores precisos das frequências naturais.

O dano em estruturas de concreto armado resulta em uma diminuição da rigidez do elemento, essa variação pode ser medida diretamente em uma diminuição das frequências naturais e um aumento do amortecimento que podem ser medidos por equipamentos como acelerômetros.

2 METODOLOGIA

Um estudo inicial das propriedades físicas dos prismas realizado com modelagem computacional no programa Diana® permitiu uma melhor compreensão inicial dos benefícios do reforço com CFRP. Por meio da modelagem numérica é possível avaliar as formas de ruptura, visualizar as frequências naturais dos elementos e compreender de que maneira as resistências e propriedades dos materiais podem influenciar no desempenho de estruturas de concreto armado. A Figura 1 ilustra a modelagem dos prismas com inserção dos reforços de CFRP e exemplos algumas das frequências naturais obtidas para os prismas.

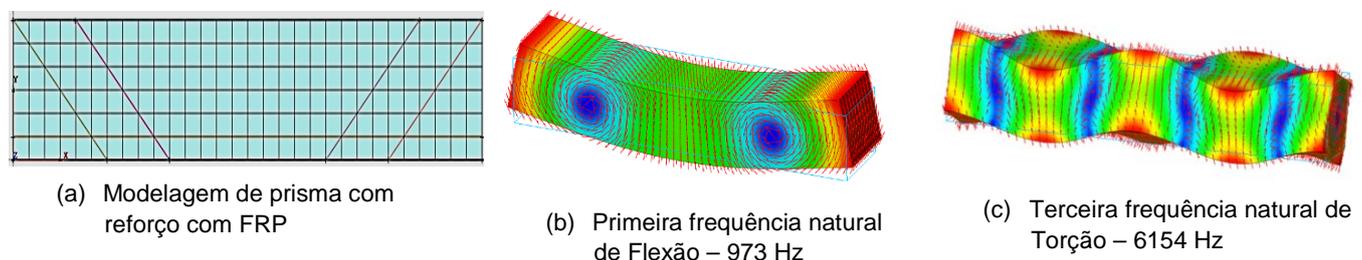


Figura 1 – Modelagem computacional.

Prismas de concreto com dimensões de 75cm x 15cm x 15cm, foram construídos com o intuito de simular vigas de concreto armado. Foram moldados vinte e quatro (24) prismas, com duas resistências à compressão (40 e 60 MPa). Seis (6) modelos foram ensaiados sem reforços ao cisalhamento, dezoito (18) modelos foram ensaiados com reforço ao cisalhamento, sendo seis (6) sem carregamento inicial, doze (12) com um pré-carregamento inicial de 40% e 70% da carga última.

O ensaio físico consiste no esquema típico de flexão por três pontos, e será instrumentado com cinco (5) extensômetros, medindo as deformações na armadura longitudinal e nas chapas de FRP e três (3) transdutores de deslocamento. (figura 2a e 2b)



Figura 2 – Esquemas de ensaios dos prismas.

Os ensaios dinâmicos foram realizados com o intuito principal de caracterizar as frequências naturais de vibração e a rigidez dos prismas. Estes foram realizados nos prismas em varias etapas: quando integro, pré-carregado, reforçado com CFRP e pós-ruptura. Para os ensaios dinâmicos foram utilizados acelerômetros piezoelétricos (figura 2e), aparelho de ultrassom (figura 2c) e analisador de sinais dinâmico para ensaio de vibração Sonelastic® (figura 2d).

Com base nos parâmetros utilizados para readequar a modelagem computacional serão criados novos modelos de vigas, com pequenas variações como orientação das fibras de reforço, resistência à compressão do concreto e seção transversal da viga. Extrapolando assim os resultados obtidos em laboratório sem a necessidade de novos ensaios.

3 DESENVOLVIMENTO

Os Prisma e Corpos de prova de concreto foram moldados em 2012, permitindo um estudo das resistências à compressão e tração, e dos módulos de elasticidade dinâmico dos concretos. Os ensaios iniciais dinâmicos foram realizados ainda no segundo semestre de 2012, e estendeu-se até o segundo semestre de 2013, neste foram medidas as variações das frequências naturais dos prismas nas diversas etapas acima citadas.

Os ensaios físicos foram realizados no segundo semestre de 2013, devendo ainda ser analisados para as conclusões sobre o reforço com a técnica NSM.

A etapa seguinte será a readequação dos modelos computacionais inserindo as propriedades dos concretos e dos prismas obtidos no laboratório. Está adequação permitira um melhor estudo de modelagem computacional com reforço de FRP na técnica NSM.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Juntamente com os prismas de concreto, foram moldados vinte e quatro (24) corpos de prova (CPs) de concreto, com duas (2) resistências diferentes, destes doze (12) foram ensaiados a resistência a compressão e doze (12) à tração, e em todos os CPs se mediu o módulo de elasticidade no analisador de sinais dinâmico para ensaio de vibração Sonelastic®.

As resistências médias dos CPs aos 28 dias para os dois concretos foram de 40,65 MPa e 58,20 MPa à compressão e de 3,15 MPa e 3,81 MPa à tração. Os Módulos de elasticidade dinâmicos longitudinais foram de 35,88 GPa e 41,03 GPa.

Os prismas ensaiados com o aparelho Sonelastic apresentaram módulo de elasticidade longitudinais com valores médios de 36,81 GPa e 40,99 GPa. Para o ensaio com acelerômetros piezoelétricos foram obtidas as frequências naturais longitudinais dos prismas e destas calculadas pela da norma ASTM C 215 (2008) os módulos de elasticidade, obtendo para os dois tipos de concreto os valores médios de 37,72 GPa e 41,39 GPa.

Os prismas foram submetidos à pré-carregamentos de 40% e 70% da carga ultima e realizado o ensaio com os aceleradores piezoelétricos, em que os prismas com concreto de 40 MPa obtiveram módulo de elasticidade de 34,19 GPa (para 40%de dano)e 30,56 GPa (para 70%de dano) , enquanto que os 58 MPa obtiveram 36,98 (para 40%de dano) e 34,19(para 70%de dano).

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os ensaios não destrutivos conseguiram identificar o dano ocorrido nos prismas, tanto para 40% da carga ultima, quanto para 70%, conseguindo medir com precisão as frequências naturais dos elementos e consequentemente seus módulos de deformação.

Os dois métodos utilizados para medir as frequências naturais dos prismas apresentaram resultados semelhantes, o que gerou uma maior segurança sobre os resultados, uma vez que nem sempre a identificação das frequências naturais é facilmente obtida.

6 REFERÊNCIAS

ARQUEZ, A. P. (2010). **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

ASTM C 215 (2008). Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens1.

BEBER, A. J.; CAMPOS F. A.; CAMPAGNOLO, J. L. (2000). **Reforço de estruturas e concreto armado com tecidos pré-impregnados de fibras de carbono**. Revista Técnica, São Paulo, n.45, p. 52-55, mar – abr.

FONSECA, T. C. C. S. (2007). **Reforço e incremento da rigidez à flexão de ligações viga-pilar de estruturas de concreto pré-moldado com polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC)**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

GAMINO, A. L. (2007). **Modelagem física e computacional de estruturas de concreto reforçadas com CFRP**. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo, São Paulo.