

Ensaio de flexão de uma viga como ferramenta para o ensino de transformações de tensões**Experimental beam bending test as tool to teaching stress transformation**

Recebimento dos originais: 02/12/2017

Aceitação para publicação: 28/12/2017

Bruno E. Higaki

Doutor em Engenharia de Estruturas pela Universidade de São Paulo (USP)

Instituição: Centro Universitário FEI, Departamento de Engenharia Civil

Endereço: Av. Humberto Castelo Branco, 3972, Assunção – São Bernardo do Campo - SP

E-mail: bruno.higaki@fei.edu.br

Fernando Cesar Ribeiro

Mestre em Engenharia de Transportes pela Universidade de São Paulo (USP)

Instituição: Centro Universitário FEI, Departamento de Engenharia Civil

Endereço: Av. Humberto Castelo Branco, 3972, Assunção – São Bernardo do Campo – SP

E-mail: fernandoribeiro.prof@gmail.com

Marcello Cherem

Mestre em Engenharia de Estruturas pela Universidade de São Paulo (USP)

Instituição: Centro Universitário FEI, Departamento de Engenharia Civil

Endereço: Av. Humberto Castelo Branco, 3972, Assunção – São Bernardo do Campo – SP

E-mail: mcherem@fei.edu.br

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia utilizada no ensino do assunto “transformação de tensões e estado plano de tensões” da disciplina Teoria das Estruturas I do Centro Universitário FEI. Anteriormente à aula expositiva sobre o assunto, 32 alunos voluntários participaram de uma atividade extra classe que consistia na resolução de quatro exercícios e no ensaio de uma viga de concreto armado submetido a flexão a quatro pontos. Os alunos procuraram e marcaram as fissuras para ao final do ensaio observar o padrão de fissuração da viga. Observou-se uma maior motivação e participação dos alunos na atividade experimental do que no método tradicional de ensino. Conclui-se que a atividade cumpriu seu objetivo pois os alunos mostraram-se mais motivados e participativos, além de entenderem mais facilmente os significados das direções dos planos principais.

Palavras-chave: Transformação de tensões; Viga de concreto; Fissuração; Tensões principais; Planos principais.

ABSTRACT

This work presents a methodology used to teach the stress transformation and plane stress part of the subject Theory of Structures I of University Center FEI. Before the stress transformation lecture, 32

volunteer students have participated of an activity that consisted on solve four exercises and the experimental reinforced concrete beam bending test. The students observed the beam cracking pattern. It was observed a greater motivation and participation of the students in the experimental activity than in the traditional method of teaching. As a conclusion, it is possible to say that the activity has reached its goal because the students were more motivated and participative. Besides that, the students have understood easily the meaning of the directions of the principal plan.

Key-words: Stress transformation; Reinforced concrete beam; Cracks; Principal stress; Principal planes.

1 INTRODUÇÃO

As disciplinas de Resistência dos Materiais e Teoria das Estruturas são de grande importância na formação do conhecimento básico na área de estruturas no curso de Engenharia Civil.

Mesmo com os investimentos e dedicação pela busca de melhores práticas de ensino, o corpo docente vivencia uma ânsia por aplicar de forma prática o conhecimento teórico adquirido em sala de aula (FLAUZINO *et al.*, 2013)

No método tradicional de ensino, os professores utilizam o tempo limitado das aulas para a transmissão de novos assuntos e conhecimentos (BIJLANI *et al.*, 2013). A maioria das escolas de engenharia utilizam o método tradicional de ensino nas disciplinas de Resistência dos Materiais e Teoria das Estruturas. Este método é centrado no professor e baseado em aulas expositivas o que resulta em uma baixa participação do aluno, pouca interação nas aulas e conseqüentemente em um elevado índice de desmotivação e reprovações (MIRANDA *et al.* 2003).

Buscando diferentes formas de motivação, maior participação dos alunos e diminuir as dificuldades apresentadas nas disciplinas, tem-se observado estudos de variadas estratégias utilizando modelos reduzidos em sala de aula (NAKAO *et al.*, 2003; DOMINGUES, 2015), ferramentas computacionais (MORAIS *et al.*, 2013; PANESI 2015), atividades práticas em laboratório (MACIEL *et al.*, 2015) e incentivo a participação em concursos (MIRANDA *et al.*, 2010).

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia utilizada no ensino do assunto “transformações de tensões e estado plano de tensões”, abordado na disciplina Teoria das Estruturas I do Centro Universitário FEI, que utiliza como introdução um ensaio de uma viga de concreto armado submetida a flexão a quatro pontos. Este ensaio é normalmente abordado em disciplinas de análise experimental de estruturas oferecidas, na maioria das vezes, como disciplinas optativas ou de pós-graduação.

2 TRANSFORMAÇÕES DE TENSÕES E ESTADO PLANO DE TENSÕES

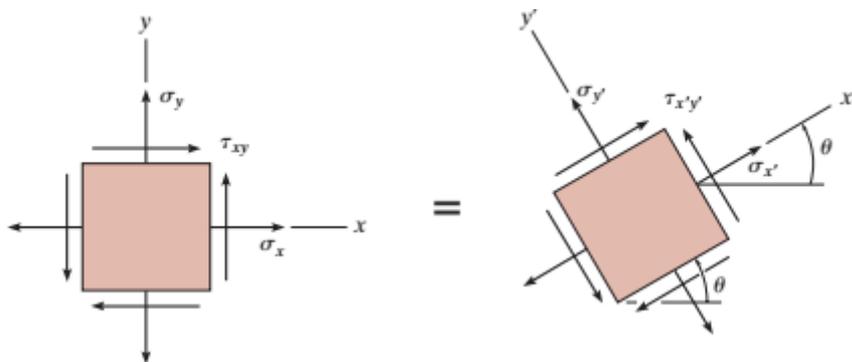
Na grade curricular do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário FEI as disciplinas semestrais de Resistência dos Materiais e Teoria das Estruturas (I, II, III e IV) possuem carga horária total de 4 horas semanais cada, onde todas estas disciplinas possuem apenas aulas teóricas.

Nas disciplinas Resistência dos Materiais e Teoria das Estruturas I são abordados os seguintes assuntos:

- Diagramas de esforços solicitantes (vigas, vigas Gerber e pórticos planos);
- Tensões normais;
- Cisalhamento puro;
- Torção;
- Flexão;
- Cisalhamento na flexão;
- Transformações de tensões e Estado Plano de Tensões.

O estudo das tensões no estado simples de tensões trata as componentes de tensões, normal e de cisalhamento, associadas a um sistema de coordenadas particular. Já no assunto “Transformações de Tensões e Estado Plano de Tensões” estuda-se a transformação das componentes de tensão em um elemento de orientação qualquer (Figura 1). A Equação (1) e a Equação (2) são utilizadas para transformar a componentes de tensão normal e tensão de cisalhamento segundo a orientação dos eixos x, y para novos eixos x', y' .

Figura 1 – Transformações de tensões para um plano de orientação qualquer (HIBBELER,2010)



$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (1)$$

$$\tau_{x'} = -\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \operatorname{sen}2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (2)$$

Já a Equação (3) e a Equação (4) determinam os valores das tensões normais máximas e mínimas (tensões principais) e o plano em que elas ocorrem.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3)$$

$$\operatorname{tg}2\theta_p = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (4)$$

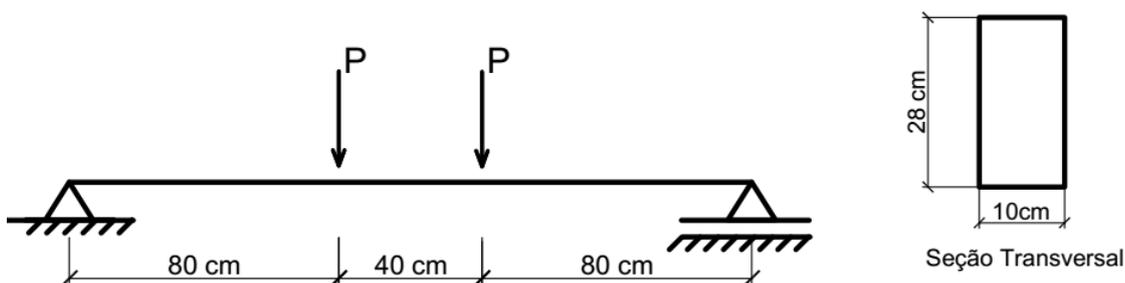
2 ENSAIO DE FLEXÃO A QUATRO PONTOS

2.1 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

A atividade realizada no laboratório de estruturas do Centro Universitário FEI consistia no ensaio de flexão a quatro pontos de uma viga de concreto armado. Este ensaio segue os padrões dos ensaios realizados em Leonhardt e Walter (1962).

A viga analisada experimentalmente possuía 200 cm de comprimento e seção transversal retangular de 10 cm X 28 cm como ilustrado na Figura 2. Nas regiões dos apoios, comprimento de 10 cm a partir das extremidades, a viga possuía seção transversal de 30 cm X 28 cm afim de problemas estabilidade em torno do eixo longitudinal da peça.

Figura 2 – Esquema estático e dimensões da viga analisada



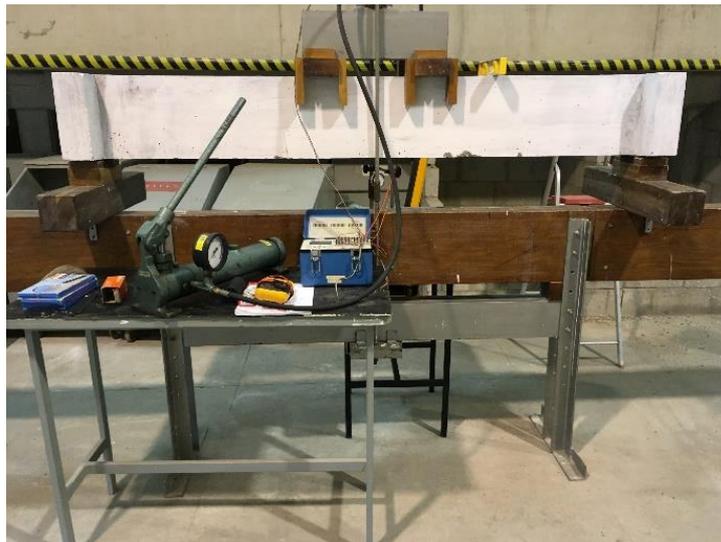
A armadura longitudinal da viga era constituída por duas barras de aço CA50 de 10 mm de diâmetro posicionadas próxima as faces superior e inferior. Já a armadura transversal era construída por estribos verticais formados por barras de aço CA50 de 5 mm de diâmetro posicionadas a cada 15 cm.

A viga foi posicionada sobre um pórtico de reação constituído por elementos de aço e madeira. O carregamento foi aplicado por meio de um macaco hidráulico em uma viga de reação

que estava apoiada em dois pontos sobre a viga de concreto e preso ao pórtico de reação. Assim, o carregamento aplicado pelo macaco hidráulico foi dividido e aplicado na viga de concreto por meio das reações de apoio da viga de reação.

A Figura 3 ilustra a configuração inicial da viga de concreto, posicionada sobre o pórtico de reação, imediatamente antes do início do ensaio.

Figura 3 – Configuração do ensaio da viga

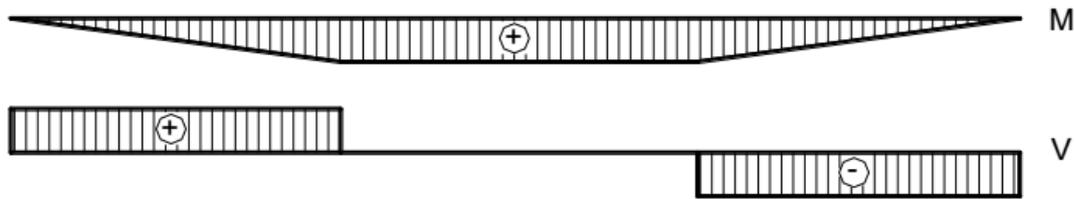


Foi utilizada uma célula de carga para realizar a leitura dos carregamentos. No meio do vão da viga foram colados strain-gages nas duas barras de armaduras posicionadas próximas a face inferior da viga com o objetivo de se obter a deformação nas armaduras. Um relógio comparador foi posicionado no meio do vão da viga para leitura dos deslocamentos verticais. Para realizar a leitura dos valores de carregamentos e deformações das armaduras foi utilizado um sistema de aquisição de dados digital.

2.2 PADRÃO DE FISSURAÇÃO NA VIGA DE CONCRETO

Para a viga submetida a flexão a quatro pontos ilustrada na Figura 2, obtém-se os diagramas de esforço cortante e momento fletor qualitativos ilustrados na Figura 4.

Figura 4 – Diagramas de esforços qualitativos



Enquanto a resistência a tração do concreto for maior do que as tensões principais de tração não ocorrerá o surgimento de fissuras na viga. As primeiras fissuras surgirão na região entre a aplicação de carregamentos, que é a região de máximo momento fletor, a partir do momento em que as tensões de tração superarem a resistência à tração na flexão do concreto. Com o aumento do carregamento, passarão a surgir fissuras inclinadas nas regiões entre os apoios e os pontos de aplicação dos carregamentos devido a atuação dos esforços cortante atuando juntamente com o momento fletor. A Figura 5 ilustra o padrão de fissuração da viga após o ensaio.

Figura 5 – Padrão de fissuração da viga (LEONHARDT & MÖNNING, 1982)



Utilizando a Equação (3) e Equação (4) podem ser utilizadas calcular as tensões principais e as direções em que elas ocorrem prevendo a inclinação das fissuras.

3 METODOLOGIA

Uma semana antes da aula expositiva sobre o assunto “transformações de tensões e estado planos de tensões”, foi proposta aos alunos uma atividade extra classe ser desenvolvida no laboratório de estruturas. Participaram da atividade 31 alunos voluntários da atividade que durou cerca de 120 minutos no total

Inicialmente os alunos foram divididos em grupos de 5 alunos e resolveram algumas questões ligadas as disciplinas de Resistência dos Materiais e Teoria das Estruturas que já haviam sido estudadas anteriormente. O objetivo dessas questões era fazer o aluno associar as teorias vistas

Brazilian Applied Science Review

em sala de aula e se prepararem para analisar de forma crítica o comportamento da viga durante o ensaio. As questões resolvidas pelos alunos eram:

- 1) Desenhe o esquema estrutural da viga que será ensaiada com a localização dos carregamentos e a seção transversal da viga (realizar medições na viga);
- 2) Considerando carregamentos concentrados de 6,5 kN, determine os diagramas de esforço cortante e momento fletor;
- 3) Calcule a tensão normal na borda inferior da seção localizada no meio do vão;
- 4) Trace um esboço da configuração final da viga fissurada ao final do ensaio.

Após a resolução das questões foi pedido para os alunos realizarem o ensaio de compressão nos corpos de provas de concreto (Figura 6). Este ensaio já havia sido abordado em outras disciplinas cursadas pelos alunos.

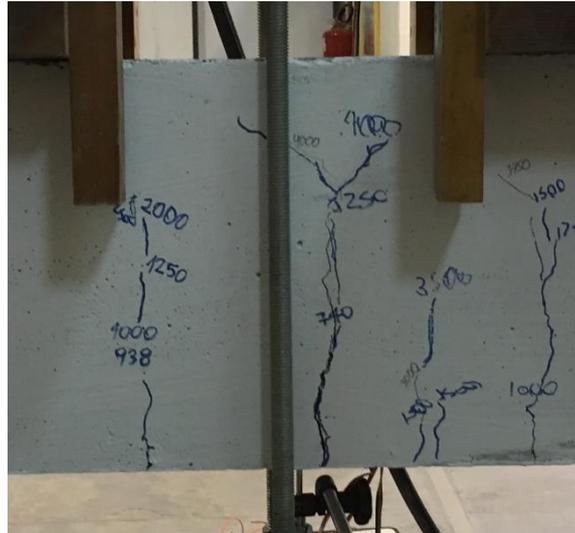
Figura 6 – Ensaio de compressão simples



Para a realização do ensaio da viga, os carregamentos foram aplicados de forma incremental a cada 2,5 kN. A cada aplicação do incremento de carga o ensaio era interrompido para a leitura das deformações nas armaduras, deslocamento vertical da viga, observação e marcação das fissuras na viga.

Como esperado as primeiras fissuras surgiram na região de maior momento fletor na direção perpendicular a direção principal de tração, no caso eixo horizontal, com um carregamento total igual a 7,4 kN (3,7 kN por ponto de aplicação) como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Fissuras observadas na região entre a aplicação de carregamentos



O ensaio continuou até um carregamento igual a 40 kN (20 kN por ponto de aplicação) quando foi constatado o escoamento da armadura e conseqüentemente impossibilidade do aumento dos carregamentos aplicados. A Figura 8 ilustra o padrão de fissuração final da viga. Pode-se observar a presença das fissuras devido ao momento fletor na região entre os pontos de aplicação do carregamento e fissuras inclinadas devido a atuação do esforço cortante em conjunto com o momento fletor.

Figura 8– Padrão de fissuração ao final do ensaio

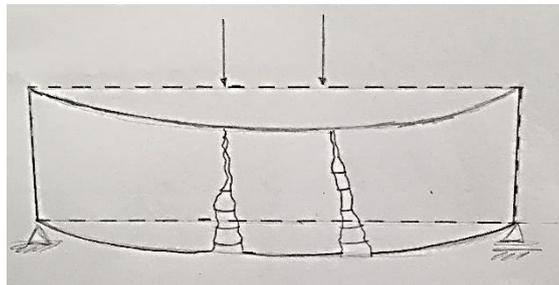


4 RESULTADOS

Analisando os resultados das questões respondidas pelos alunos, pode-se constatar que todos os grupos responderam de forma corretas as questões 1, 2 e 3. Já para a questão 4 na qual pedia para

os alunos esboçarem a forma final da viga fissurada observou-se que todos os grupos desenharam fissuras apenas na região de aplicação de carregamentos indicando uma abertura excessiva de fissuras embora tenham percebido que as fissuras ocorrem a partir da borda mais tracionada (Figura 8).

Figura 8– Resposta obtida quanto ao padrão de fissuração final



Neste ponto a atividade mostrou-se importante pois o aluno pode observar e realizar a marcação das fissuras na viga entendendo que as primeiras fissuras apareceram na região de máximo momento fletor. Outro ponto importante foi a percepção dos alunos de que as fissuras não ficaram concentradas em apenas um ponto específico e nem apresentaram apenas uma direção.

Durante a atividade pode-se perceber uma grande motivação e participação dos alunos que se sentiram muito mais estimulados ao trabalharem conceitos já estudados como ensaio de compressão simples, cálculo de diagramas de esforços, cálculo de tensões normais além de observarem fenômenos ainda não estudados como a formação e direção de fissuras na viga de concreto.

Quanto a abordagem em sala de aula, ao abordar o assunto “transformação de tensões e estado plano de tensões” e resolver um exercício similar a estrutura ensaiada em laboratório, o professor pode perceber que os alunos que participaram da atividade conseguiram entender mais facilmente o significado das direções dos planos principais e as tensões principais.

Acredita-se, também, que a observação do padrão de fissuração na viga de concreto estimulará o aprendizado na disciplina Estruturas de Concreto I ministrado no 7º ciclo do curso de Engenharia Civil. Nos semestres seguintes, pretende-se analisar novamente a atividade proposta

medindo o desempenho de dois grupos que realizarão a atividade em laboratório em momentos diferentes, parte dos grupos realizarão antes da aula teórica enquanto a outra parte realizará após a aula teórica sobre o assunto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma metodologia adotada na disciplina Teoria de Estruturas I do Centro Universitário FEI para o ensino do assunto transformações de tensões e estado plano de tensões a qual utilizou-se um ensaio de flexão a quatro pontos de uma viga de concreto armado como ferramenta auxiliar.

Com esta atividade procurou-se analisar a motivação e participação dos alunos, a aplicação de conhecimento adquiridos em disciplinas cursadas previamente além do auxílio que a atividade proporcionou ao ensino da parte teórica da matéria.

A atividade cumpriu seu objetivo pois os alunos mostraram-se mais motivados e participativos, além de entenderem mais facilmente os significados das direções dos planos principais

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário FEI pelo suporte financeiro para a condução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BIJLANI, K.; CHATTERJEE, S.; ANAND, S. Concept Maps for Learning in a Flipped Classroom In: *2013 IEEE Fifth International Conference on Technology for Education*, 2013, pp. 57-60.

DOMINGUES, J. R. Desenvolvimento de modelos didáticos para as disciplinas da área de estruturas. Relatório Técnico Científico. Universidade Federal do Pará. 2015.

FLAUZINO, J.P.P.N et al. Laboratório Divergente: convergindo práticas de ensino e de pesquisa. In: *XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*, 2013. p. 36.

HIBBELER, R. C. Resistência dos materiais. Pearson Prentice Hall, 2010.

LEONHARDT, F. ; MÖNNIG, E. Construções de concreto – Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado, v. 1. Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 1982.

LEONHARDT, F.; WALTHER, R. Beiträge zur Behandlung der Schubprobleme im Stahlbetonbau. *Beton und Stahlbetonbau*. v. 57. n. 7. Jul. 1962.

MACIEL, O. R. et al. Projeto e construção de uma proteção de bancada didática para ensino de estruturas. *Salão do Conhecimento*, v. 1, n. 1, 2015.

MIRANDA, R. J. P. C. et al., Experimental stress analysis and the mechanical engineers courses. In: Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics – SEM, North Carolina, USA, 2003.

MIRANDA, R. J. P. C. et al, A importância do laboratório e das competições no processo de ensino e aprendizagem de resistência dos materiais e mecânica dos sólidos. In: XXXVIII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2010.

MORAIS, C.; BRAGA, G.; ; ARAÚJO, P. H. Utilização de planilhas eletrônicas no ensino de resistência dos materiais. *Nuevas Ideas en Informática Educativa TISE*. p. 613-616. 2013

NAKAO, O. S. ; GUARITA FILHO, J. A. A. ; MONTEIRO, C. O. . Os modelos físicos e o Laboratório Didático de Resistência dos Materiais. In: XXI Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 2003.

PANESI, A. R. Q. Aplicação do computador como ferramenta de aprendizado de disciplinas técnicas. *Engevista*, v. 17, n. 4, p. 567-572, 2015.