



## COMO AMPLIAR A APRENDIZAGEM DE RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS EM UM CURSO DE GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA?

**Pedro Wellington G. N. Teixeira** – pedro-wellington@uol.com.br

**Oswaldo S. Nakao** – osvaldo.nakao@poli.usp.br

Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Depto de Eng. de Estruturas e Geotécnica  
Av. Professor Almeida Prado, Travessa 2, nº 83.  
05508-200 São Paulo SP

***Resumo:** Neste trabalho, descreve-se a execução de ensaios realizados em modelos reduzidos de estruturas. Estes ensaios foram planejados como parte das atividades da disciplina PEF 2306 – Tópicos de Mecânica dos Sólidos, oferecida regularmente pelo Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica (PEF) para o Curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São apresentados os estudos preliminares que conduziram à definição dos ensaios incluindo a seleção de materiais, forma de participação dos alunos, quantidade de ensaios, bem como outras características específicas. Descrevem-se os resultados dos ensaios e procura-se avaliar a eficácia dos mesmos sobre a aprendizagem. Acredita-se que a metodologia descrita permite que seja estimulado o interesse dos alunos por estes importantes conhecimentos, despertando os diferentes estilos de aprendizagens existentes por meio de desafios que sejam exequíveis e motivadores.*

***Palavras-chave:** Mecânica dos Sólidos; modelos reduzidos; aprendizagem.*

### 1. INTRODUÇÃO

O ensino de Resistência dos Materiais nos cursos de graduação de engenharia se constitui em um grande desafio devido à complexidade dos fenômenos naturais aos quais os alunos são apresentados. Geralmente, são problemas que foram estudados por grandes cientistas ao longo de muito tempo e nem sempre os sentidos são suficientes para intuir e interpretar o que ocorre.

De maneira geral, em um curso de Resistência dos Materiais, ou Mecânica dos Sólidos, estuda-se o comportamento de corpos, buscando-se determinar tensões e deformações quando os mesmos estão sujeitos a diversos tipos de carregamentos. No caso de alunos de graduação de algumas modalidades de engenharia, pode parecer para os mesmos que tal estudo não representa uma parte essencial do seu aprendizado para exercício de suas atribuições. Nesse ponto, não é exagero dizer que cuidados adicionais podem ser necessários para estimular o interesse dos alunos por esta área de conhecimento e permitir que os mesmos tenham melhor

Realização:



Organização:





aproveitamento.

Um dos aspectos a ser considerado é a existência dos diferentes estilos de aprendizagem que obriga o professor a propor variadas estratégias de ensino se deseja que a assimilação da turma seja potencializada. Atualmente, a consciência dessa variabilidade na forma de aprender tem sido amplamente considerada (Pashler, H et al., 2009).

No processo de ensino e aprendizagem em um curso de graduação em que a maioria das aulas é por meio de técnicas expositivas, a realização de ensaios em laboratórios estimula as mentes dos jovens alunos a tentarem entender melhor o fenômeno natural que está sendo estudado. Além disso, com o acompanhamento de ensaios é possível que se percebam limitações da análise teórica, devidas às incertezas envolvidas, fato essencial para que se entenda a necessidade de coeficientes de segurança em problemas de dimensionamento estrutural. Por outro lado, características específicas dos cursos de graduação em Engenharia da EPUSP, notadamente o fato das classes apresentarem 60 alunos ou mais, tornam necessário um planejamento criterioso para se atingirem tais objetivos.

Atualmente, a existência de equipamentos com grande sensibilidade permite que se obtenham registros bastante precisos de experimentos realizados com modelos reduzidos de estruturas. Isso reduz custos e viabiliza a execução de ensaios que podem ampliar a percepção dos estudantes para a complexidade dos problemas que fazem parte do dia a dia do profissional de engenharia. Por outro lado, torna-se imperiosa a necessidade de abordagem teórica mais aprofundada do problema a fim permitir melhor aproveitamento dos resultados obtidos no ensaio.

## **2. DESCRIÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS**

### **2.1. Motivação para o ensaio**

Na disciplina PEF 2306 – Tópicos de Mecânica dos Sólidos para alunos do 5º semestre letivo de Engenharia Mecatrônica, um dos assuntos abordados é a flambagem por flexão de barras. O assunto é limitado à teoria de pequenas deformações com o material seguindo a Lei de Hooke.

Por iniciativa do Professor Edgard Sant’anna, responsável pela disciplina, a abordagem teórica do problema com as hipóteses citadas é tratada de forma bastante completa. Além disso, o tratamento teórico é detalhado em notas de aula elaboradas com extrema preocupação didática (Sant’anna Neto, 2011). Esse panorama estimulou o planejamento de um experimento com objetivo de ilustrar o fenômeno e ao mesmo tempo permitir aos alunos a aplicação das expressões deduzidas nas aulas teóricas.

O experimento foi adaptado a partir de uma ideia apresentada por Pearce (1978), ilustrado na Figura 1.

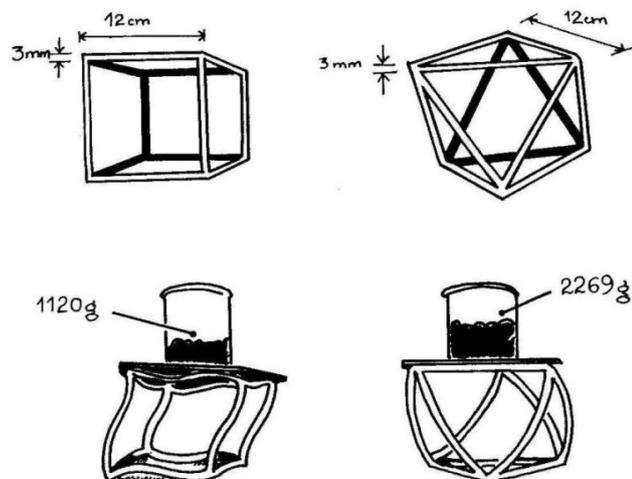
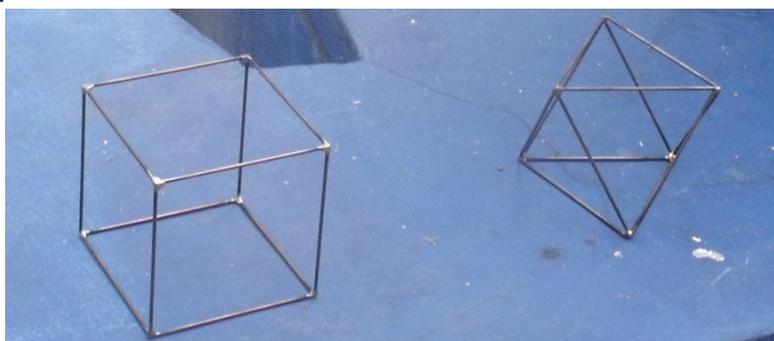


Figura 1 – Experimento realizado por Pearce (1978) de dois modelos reduzidos, um pórtico e uma treliça.

## 2.2. Definições prévias

Inspirado nessa proposta foi planejado o ensaio descrito neste trabalho. Inicialmente, deparou-se com a dificuldade de escolha do material a ser utilizado. Após apresentar a proposta aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Materiais estruturais (LEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica (PEF), os mesmos indicaram a alternativa de se utilizar arame de solda.

Dois modelos foram preparados e foram testados de forma simplificada, conforme se ilustra na Figura 2.



(a)



(b)

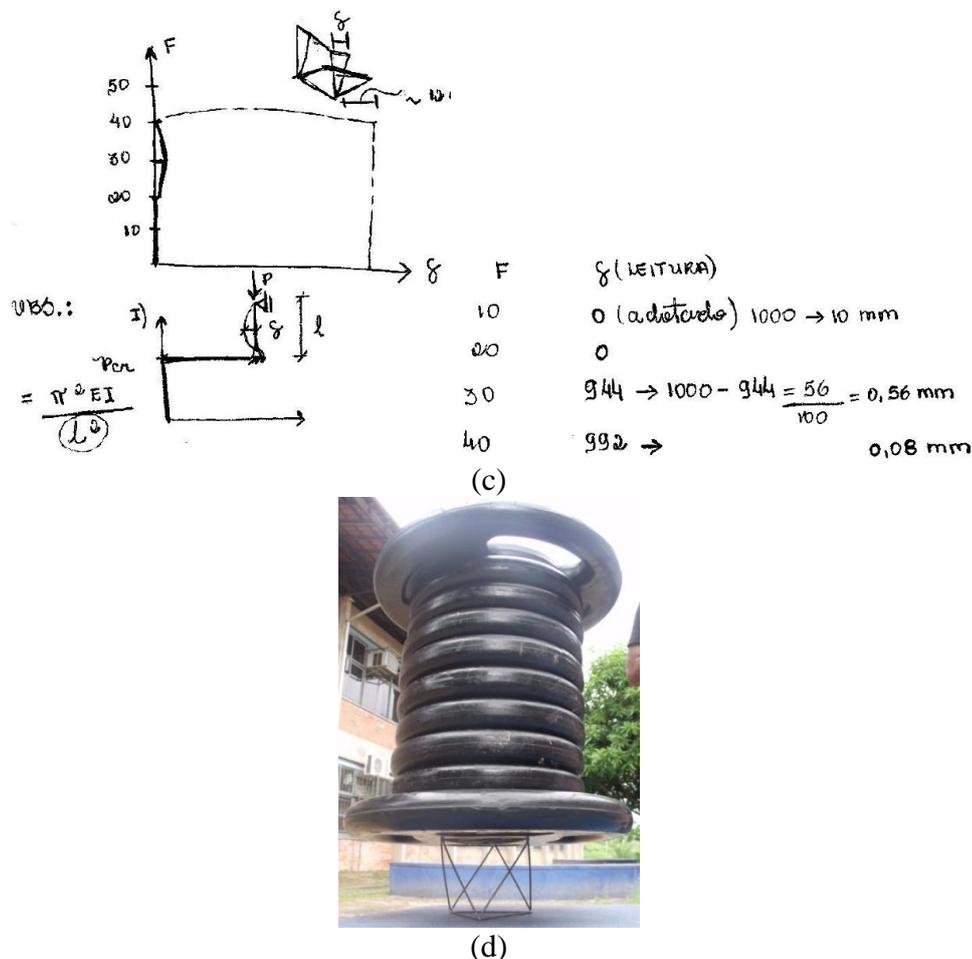


Figura 2 – Ensaio piloto e estudos teóricos preliminares para definição da metodologia.

Da análise dos resultados dos ensaios piloto, foi possível estimar a resistência das estruturas. Verificou-se também que a ruína foi brusca, não obstante estar sendo usado material muito dúctil. Por outro lado, a aplicação da carga deveria ser feita de maneira mais controlada, pois, da maneira como os ensaios piloto foram feitos, não seria possível definir a carga em que ocorreu o colapso – seria possível tão somente estimar um intervalo de valores, correspondente ao último incremento de carregamento. Finalmente, ficou claro que o ensaio ensejaria muitas discussões interessantes sobre o assunto.

### 2.3. Metodologia detalhada

Primeiramente, foram confeccionados quatro modelos de cada tipo de estrutura, num total de oito modelos: quatro pórticos e quatro treliças.

Cada pórtico foi formado por doze barras de eletrodo com 12 cm de comprimento e diâmetro e 2,38 mm, dispostos segundo as arestas de um cubo.

Cada treliça foi formada também por doze barras de eletrodo com 12 cm de comprimento e 2,38 mm de diâmetro, dispostas segundo as arestas de um octaedro regular.

As ligações foram feitas por solda. Nota-se que os dois modelos estruturais consomem a mesma quantidade de materiais.

Todos os modelos apresentados neste trabalho foram confeccionados pelo Técnico Juca Jacomini, da EPUSP/PEF/LEM.



Nove exemplares dos eletrodos foram destinados à caracterização do material, por meio de ensaio de tração, que foram realizados previamente aos ensaios das estruturas.

Os ensaios foram feitos em uma prensa universal Emic DL-10000 (capacidade de 10 tf = 100 kN). Para os ensaios de tração utilizou-se controle de deslocamentos com velocidade de 0,1 mm/s e para os ensaios dos modelos foi programada velocidade de deslocamento de 0,5 mm/s, pois neste segundo ensaio os deslocamentos poderiam alcançar valores de até 12 cm.

A disciplina PEF 2306 tem 92 alunos matriculados regularmente nas duas turmas, uma sob a responsabilidade do Prof. Edgard Sant'anna e outra sob a responsabilidade do Prof. Pedro Wellington Teixeira. Dessa forma, planejou-se dividir a turma em quatro partes, a fim de proporcionar melhor aproveitamento para os alunos.

No laboratório, o computador que comanda a máquina de ensaio foi ligado a um projetor que apresentava os valores de força e de deslocamento à medida que o ensaio vai sendo realizado em uma escala mais visível para a classe. Essa estratégia é utilizada em situações como essa em que o laboratório é mais de demonstração.

O Eng. Ivan Tessarolo, do LEM, participou ativamente do planejamento e executou os ensaios nos dias e horários combinados. Os ensaios foram distribuídos em duas aulas da disciplina, ocupando dessa forma 4 h de duração, no total.

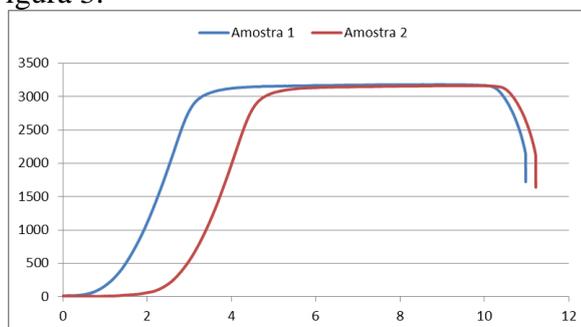
Os ensaios foram todos realizados no Laboratório de Revestimentos, um dos laboratórios existentes no Hall Tecnológico do Prédio da Engenharia Civil.

### 3. RESULTADOS OBTIDOS

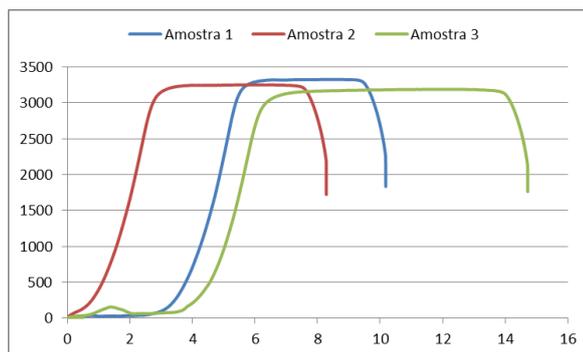
Com a evolução dos equipamentos e das técnicas de divulgação de imagens, observa-se cada vez mais uma aceitação passiva dos resultados que sejam obtidos por intermédio de programas de computadores. Não há a preocupação em questionar e em entender o fenômeno físico. Essa tendência faz com que muitos estudantes cheguem aos cursos de engenharia sem ter desenvolvido a sensibilidade e a intuição, por exemplo, para um melhor aproveitamento dos materiais. Surge daí a necessidade de se propor experimentos com modelos físicos como estratégia didática (Moreno et al, 2009).

#### 3.1. Ensaio de caracterização do material

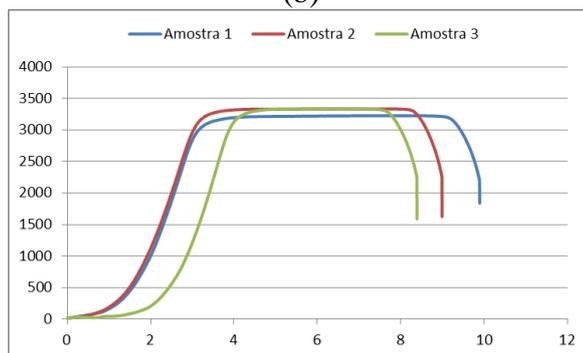
Para realização dos ensaios de caracterização do material, a turma foi separada em quatro grupos. Para cada grupo, foram realizados de dois a três ensaios, conforme fosse registrada, ou não, diferença significativa entre os dois primeiros ensaios. Os resultados encontram-se resumidos nos gráficos da Figura 3.



(a)



(b)

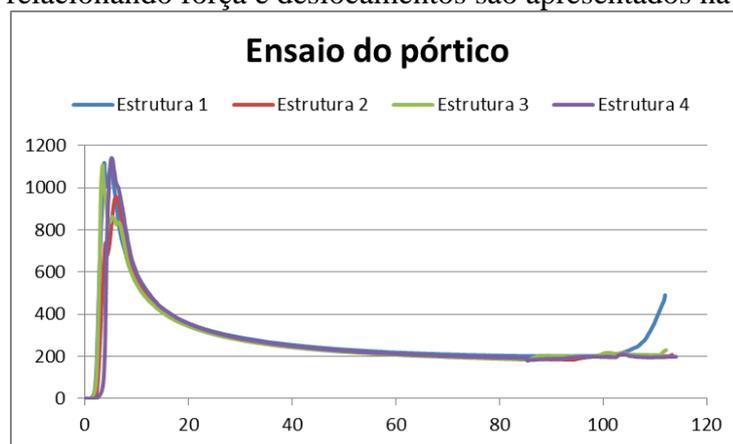


(c)

Figura 3 – Gráficos força x deslocamento resultantes dos ensaios de tração executados para caracterizar o material; forças em N e deslocamentos em mm.

### 3.2. Ensaios dos modelos reduzidos

Uma vez caracterizado o material, foram feitos os ensaios dos modelos reduzidos, cujos gráficos relacionando força e deslocamentos são apresentados na Figura 4.



(a)

|               |
|---------------|
| <b>1118,1</b> |
| <b>955,45</b> |
| <b>1106,4</b> |
| <b>1140,7</b> |

(b)

Figura 4 – Resultados dos ensaios dos pórticos: (a) gráfico força x deslocamento vertical; (b) valores de pico das forças (N).

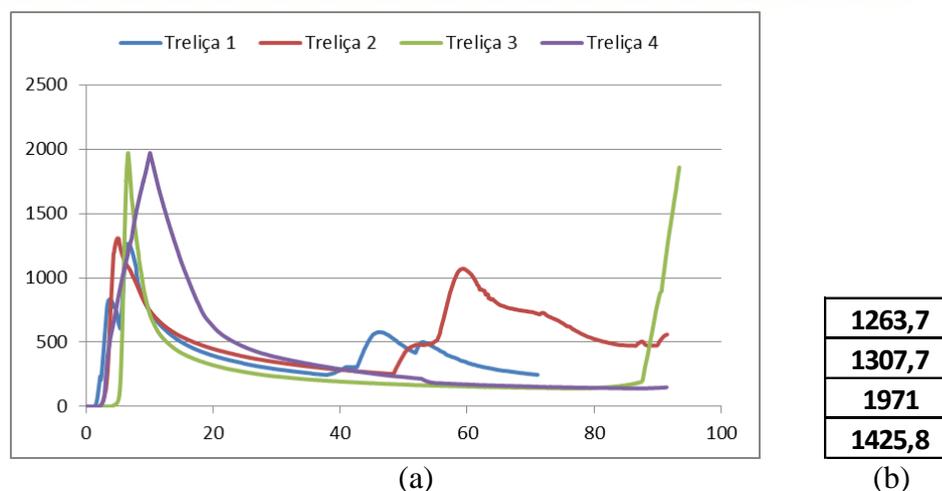


Figura 5 – Resultados dos ensaios das treliças: (a) gráfico força x deslocamento vertical; (b) valores de pico das forças.

Os gráficos mostrados na Figura 5 permitem que se verifiquem diversos aspectos do comportamento estrutural dos modelos. Como exemplo desses aspectos pode-se citar: a descrição do modo de ruptura; a variabilidade dos valores obtidos; os diversos tipos de comportamento da estrutura, quando se consideram aspectos físicos e geométricos.

## 4. COMENTÁRIOS

### 4.1. Iniciais

É interessante observar que houve duas metodologias de ensaio. Em um dos ensaios, feito como estudo piloto, a carga foi aplicada por meio de pesos colocados sobre os modelos; no outro ensaio, a força foi aplicada por meio de uma prensa. Devem-se destacar diferenças importantes entre as duas metodologias.

Ao se aplicar a carga por meio de pesos, está sendo feito um ensaio com controle de força. Além disso, da maneira como a carga foi aplicada, não há nenhuma restrição lateral para deslocamentos horizontais do modelo carregado, o que permite o colapso por tombamento, que de fato ocorreu no ensaio.

O ensaio com controle de força pode ser feito também em uma máquina de ensaios, o que possibilita maior controle. No ensaio com aplicação de pesos, não se conhece com precisão o valor da carga última, apenas o intervalo em que se situa. Isso pode ser visto no gráfico força-deslocamento mostrado na Figura 6.

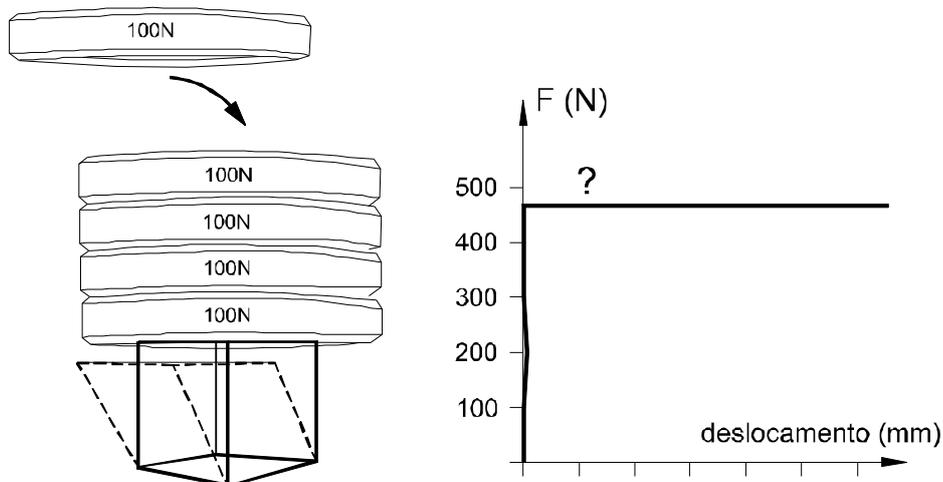


Figura 6 – Ensaio com controle de força por aplicação de pesos – não se conhece o valor correto da força correspondente ao colapso, e sim o intervalo de valores de carga correspondente ao colapso.

Outra metodologia consiste no ensaio com controle de deslocamento. A figura abaixo (Figura 7) ilustra o ensaio por meio de uma analogia simples e apresenta o gráfico força-deslocamento correspondente. Neste ensaio, quando se atinge a carga última, reduz-se gradualmente a força aplicada, mantendo-se constante e controlada a velocidade de deslocamento do modelo ensaiado. Este ensaio somente é possível de ser realizado em uma máquina de ensaios.

É interessante dizer que, em uma estrutura real, não é possível efetuar-se o controle de deslocamento salvo em casos especiais.

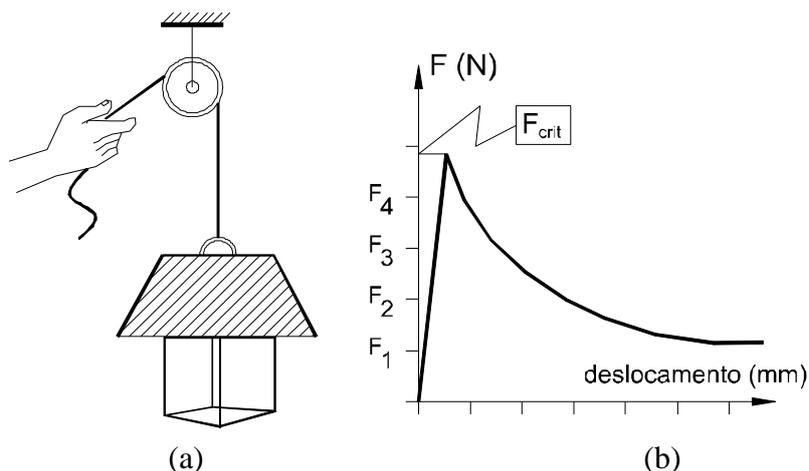


Figura 7 – (a) Analogia simples e correntemente empregada para explicar o ensaio com controle de deslocamentos; (b) gráfico força-deslocamento obtido em ensaio com tais características.



Por fim, é interessante analisar os resultados obtidos no ensaio à luz da teoria. Tomando-se o exemplo do modelo cúbico, que tem geometria mais simples, podem ser feitas algumas considerações para efetuar cálculos de estimativa do valor teórico da resistência do modelo.

Considere-se a situação do modelo carregado na prensa, do qual se tem valores mais precisos obtidos no experimento. Observa-se que a deformada foi simétrica, sendo que as quatro barras verticais fletiram com a concavidade voltada para dentro da estrutura (Figura 8).

É interessante chamar a atenção para o fato de que não seria provável que as barras fletissem no outro sentido, ou seja, com a concavidade voltada para fora. Isso porque a flexão das barras verticais é acompanhada por flexão das barras horizontais que estão confinadas pelas placas de aplicação do carregamento e, portanto, somente poderão fletir com as concavidades voltadas para tais placas.

Dessa forma, é razoável que sejam feitas as seguintes hipóteses:

- Cada uma das quatro barras do modelo absorveu  $\frac{1}{4}$  da força total aplicada;
- O modo de ruína foi flambagem por flexão, pois se observa bifurcação do equilíbrio em um determinado valor da carga e também se pode observar que a deformada corresponde à flexão da barra;
- A análise da deformada permite verificar que as vinculações nas extremidades das quatro barras verticais são intermediárias entre apoios articulados e engastes;



Figura 8 – Deformada do modelo cúbico.

Assim, é possível determinar valores superior e inferior para a carga última de uma das barras verticais, utilizando-se a fórmula de Euler, chegando-se a:

- $(\frac{1}{4}) P_{crit,sup} = \pi^2 EI / (0,5L)^2 = 893 \text{ N};$
- $(\frac{1}{4}) P_{crit,inf} = \pi^2 EI / (L)^2 = 223 \text{ N};$

Nos cálculos acima, foi utilizado:  $E = 200.000 \text{ N/mm}^2$ ;  $I = \pi x(2,4)^4 / 64 = 1,6286 \text{ mm}^4$  e  $L = 120 \text{ mm}$ .

Como há quatro barras verticais resistindo à carga, e foi feita hipótese de que cada uma das barras resiste à mesma parcela da carga, justificada pela observação do modo de colapso no experimento, pode-se dizer que a carga crítica teórica estaria entre  $4 \times 223 \text{ N} = 892 \text{ N}$  e  $4 \times 893 \text{ N} = 3572 \text{ N}$ .

A partir dos resultados dos quatro ensaios desses modelos, obteve-se o valor médio da carga última de 1080 N, portanto, mais próxima do valor inferior. Ou seja,  $892 \text{ N} < 1080 \text{ N} < 3568 \text{ N}$ .

Para melhorar a precisão do cálculo da carga crítica, poder-se-ia efetuar análise elástica do pórtico submetido à flexão, para estimar o grau de engastamento que as barras horizontais irão fornecer para as barras verticais. Isso está além dos objetivos deste trabalho, mas deverá ser feito pelos alunos como atividade relacionada à análise dos resultados.



#### **4.2. Aspectos a serem considerados na análise dos resultados**

Embora o objetivo deste trabalho não seja discutir aspectos técnicos de engenharia de estruturas, e sim apresentar uma metodologia de ensino, cumpre relacionar alguns pontos importantes que surgem naturalmente quando se procura analisar os resultados obtidos nos ensaios.

Em primeiro lugar, para análise teórica, os alunos precisarão elaborar modelos que demandarão:

- Dados sobre a geometria das estruturas;
- Propriedades mecânicas do material;
- Elaboração de diagramas de corpo livre das estruturas;

O ensaio de caracterização permitiu estabelecer com razoável nível de precisão as propriedades geométricas e mecânicas.

A definição das vinculações da estrutura irá resultar na elaboração dos diagramas de corpo livre. Para isso, os alunos deverão exercitar suas capacidades de visualizar interações físicas entre os elementos da estrutura e a própria máquina de ensaio.

Por fim, a variação dos resultados irá suscitar uma discussão sobre as causas dessas variações, que envolvem inclusive a influência que cada forma estrutural tem sobre o processo de fabricação das estruturas. Além disso, será possível discutir sobre as limitações e a aplicabilidade da teoria apresentada em sala de aula.

#### **4.3. Sobre a participação dos alunos**

A participação dos alunos deu-se de forma efetiva nas seguintes etapas do processo:

- Medição das dimensões das barras utilizadas para ensaios de caracterização do material, com uso de equipamento adequado;
- Análise dos resultados dos ensaios de caracterização de materiais e determinação numérica dos valores de área da seção transversal, momento de inércia da seção transversal das barras ensaiadas;
- Análise dos resultados dos ensaios de caracterização de materiais e determinação numérica do módulo de elasticidade do material;
- Análise dos esforços nos elementos das estruturas, pórtico e treliça espaciais;
- Aplicação da teoria apresentada em sala de aula para interpretação dos resultados de ensaios de modelos;
- Elaboração de relatório conclusivo sobre os ensaios.

#### **4.4. Sobre a eficácia da realização dos ensaios**

A fim de compor um panorama que permita uma primeira avaliação da eficácia da realização dos ensaios sobre a aprendizagem dos alunos, pretende-se analisar detalhadamente os relatórios elaborados pelos alunos. Além disso, pretende-se elaborar um questionário a ser respondido pelos alunos.



## 5. CONCLUSÕES

Apresentou-se uma descrição de ensaios didáticos realizados com finalidade de estudar o problema de flambagem de barras na disciplina PEF 2306, com os alunos do curso de graduação em Engenharia Mecatrônica da EPUSP.

Os ensaios foram planejados de forma que permitissem a participação dos alunos em diversas etapas do processo e, principalmente, de fornecer subsídios para que os alunos interpretassem a validade e a aplicabilidade da formulação teórica descrita detalhadamente nas aulas teóricas da disciplina referentes a este assunto. A realização de tal atividade foi possibilitada pela disponibilidade de notas de aula preparadas com clareza e precisão bem como da disponibilidade de técnicos e equipamentos para realização dos ensaios.

A eficácia da realização dos ensaios sobre a aprendizagem será avaliada de forma adequada por meio de análise detalhada dos relatórios dos alunos bem como pela aplicação de questionário. A partir da análise preliminar da participação e interesse despertado nos alunos, presume-se que os ensaios tem impacto positivo considerável no processo de aprendizagem.

Para aprender é fundamental a motivação e ela surge diante de desafios. Sem desafios não há aprendizagem e o desafio não pode ser muito distante, a sugestão é propor ensaios como este aqui descrito.

### *Agradecimentos*

Os autores gostariam de expressar seus sinceros agradecimentos aos técnicos do Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica (PEF), Eng. Ivan Tessarolo e Técnico Juca Jacomini, bem como à Professora Renata Monte do Departamento de Construção Civil (PCC) da EPUSP, Especialista do Laboratório de Revestimentos da EPUSP-PCC. Sem a efetiva participação e o apoio dessas pessoas não teria sido possível alcançar os objetivos deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MORENO, C., ABAD, A., GERDINGH, J. G., GARCIA M., C., GONZALEZ C., O. Didactic strategies for comprehension and learning of structural concepts. **Anais: International Association for Shell and Spatial Structures Symposium 2009**, Valencia.

SANT'ANNA NETO, E. A. PEF 2306 – Tópicos de Mecânica dos Sólidos. Notas de Aula. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

PEARCE, P. Structures in nature is a strategy for design. MIT, 1978.

PASHLER, H., MCDANIEL, M., ROHRER, D., BJORK, R. Learning Styles. Psychological Science in the public interest (Journal of the Association for Psychological Science), 2009, v.9, pp 105-118.



**Abstract:** *This document presents detailed instructions of tests in reduced scale structural models. These tests were performed as part of activities of PEF 2306 – Topics on Solids Mechanics, course offered regularly by Department of Structural and Geotechnical Engineering (PEF) to students of the undergraduate program in Mechatronics Engineering from Polytechnic School of University of São Paulo (EPUSP). This paper presents the preliminary studies that led to definition of tests including materials selection, form of participation of students, the quantity of tests to be performed as well as other specific features. Results of tests are described and one seeks to evaluate theirs effectiveness on learning. It is believed that the methodology here described could stimulate student's interest in these important knowledge, awakening the different styles of learning through the existing challenges that are achievable and motivating ones.*

**Key-words:** *Solid Mechanics; scale models; learning;*