



Anais do XXXIV COBENGE. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, Setembro de 2006.
ISBN 85-7515-371-4

A INTERDISCIPLINARIDADE DO ENSINO DE ELEMENTOS FINITOS NO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL: APRENDIZAGEM E ASPECTOS PEDAGÓGICOS UTILIZANDO A FERRAMENTA COMPUTACIONAL ANSYS

Prof. Dr. Eng. Alex A. Bandeira – alex_bandeira@mackenzie.com.br

Universidade Presbiteriana Mackenzie, Escola de Engenharia, Engenharia Civil
Rua da Consolação, 896 – Consolação, Prédio 06
CEP 01302-907 São Paulo – SP

Eng. Maurício R. P. Chivante – mauchivante@mackenzista.com.br

Universidade Presbiteriana Mackenzie, Escola de Engenharia, Engenharia Civil
Rua da Consolação, 896 – Consolação, Prédio 06
CEP 01302-907 São Paulo – SP

Resumo: *Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados obtidos na aprendizagem acadêmica da disciplina de Método dos elementos finitos do curso de engenharia civil da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Neste artigo são apresentados os conceitos e a interdisciplinaridade existente entre a disciplina Método dos Elementos Finitos e as demais disciplinas ministradas no curso de engenharia civil, como por exemplo, cálculo diferencial e integral I, II e III, computação básica e programação I e II, álgebra linear, mecânica dos sólidos I e II, cálculo numérico, resistência dos materiais I e II, pesquisa operacional, softwares aplicados à engenharia civil e estabilidade das construções I, II e III. Além disto, é apresentada uma alternativa ao ensino de sistemas estruturais mais completos e profissionais, de formulação complexa, em um nível de graduação. Essa oportunidade é possível de ser vivenciada pelos educandos por meio da utilização de recursos computacionais de elementos finitos, como a implantação do software generalista ANSYS na parte prática da disciplina de Métodos dos elementos finitos. Neste momento da disciplina são incentivadas a modelagem estrutural e computacional de sistemas estruturais e a interpretação física dos resultados obtidos, possibilitando assim que o graduando desenvolva melhor a interpretação do comportamento estrutural em estudo.*

Palavras-chave: *Ensino, aprendizagem, interdisciplinaridade, elementos finitos, mecânica computacional.*

1. INTRODUÇÃO

Durante muito tempo, os tópicos de estruturas no curso de engenharia civil foram considerados tabus quanto à sua dificuldade em serem compreendidos. Os graduandos sempre desenvolveram dificuldades em interpretar os esforços internos reativos às solicitações. Por muitas vezes, as disciplinas relacionadas ao tema tiveram sua importância minimizada à solução de sistemas estáticos, via aplicação de equações de equilíbrio ou de técnicas analíticas.

Entretanto, o uso exclusivo de equações de equilíbrio viabiliza a resolução de um grupo limitado de sistemas estruturais (os isostáticos). Já para a solução dos sistemas hiperestáticos, o uso de técnicas analíticas também limita sua aplicação, devido à necessidade de grande esforço físico para sua implementação e, em casos mais complexos, a necessidade de uma ferramenta computacional que viabilize a solução do problema.

Outra limitação encontra-se na dificuldade de apresentação de modelos estruturais que fossem além daqueles representados por modelos de barras (como as treliças, as vigas e os pórticos). Esta limitação reside na complexidade das formulações destes elementos de ordem superior, que englobam formulações variacionais e tensoriais em sua caracterização.

Deste modo, a disciplina de elementos finitos, associada ao uso de sistemas computacionais (como o software ANSYS), vem no intuito de sedimentar os conceitos apresentados nas matérias convencionais de engenharia de estruturas, e de desenvolver no graduando uma sensibilidade para a análise de outros elementos. Este desenvolvimento é possível uma vez que, apenas com uma conceituação generalista do elemento de modelagem (sem necessariamente entrar na região variacional e tensorial da formulação), é possível apresentar uma saída de dados que contemple a variação dos esforços internos reativos da estrutura. Com esta saída de dados, é possível implementar uma discussão crítica da aplicabilidade, das restrições, e das reações de diferentes elementos de modelagem.

2. TÓPICOS DO ENSINO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS E SUA INTERDISCIPLINARIDADE

Os cursos de engenharia civil apresentam, em sua maioria, conceitos clássicos da resistência dos materiais e da estabilidade das construções. Das disciplinas de resistência dos materiais temos a apresentação dos conceitos fundamentais da análise estrutural. São desenvolvidos estudos referentes às reações de apoio, análise de momentos fletores e forças cortantes. São também apresentados conceitos de tensão, deslocamento, deformação, análise de estruturas submetidas a esforços de flexão, torção e de cisalhamento, além dos conceitos de flecha, rotação e flambagem.

Já as disciplinas relacionadas à estabilidade das construções têm por objetivo a solução estática de sistemas estruturais isostáticos e hiperestáticos, determinando sempre que possível seus diagramas de esforços normais, cortantes e fletores, além de suas flechas e rotações. Com referência aos sistemas isostáticos, os mais estudados são as vigas retas, curvas e poligonais, bem como os arcos e pórticos tri-articulados. Já em relação aos sistemas hiperestáticos, são apresentadas técnicas de resolução destes sistemas, como a equação dos três momentos, a análise de linhas de influência de vigas contínuas, o Método dos Deslocamentos, o Método das Forças e o estudo da energia de deformação (conhecido como Método da Energia).

Porém, o que muitos alunos não percebem de imediato é a interdisciplinaridade envolvida diretamente nestes estudos. Somente para citar alguns vínculos, podemos citar aqueles que se apresentam de modo mais evidente. Das disciplinas de cálculo diferencial, apresentam-se os

conceitos de derivada, derivada direcional e integral, conceitos estes amplamente utilizadas na determinação diferencial da linha elástica da estrutura, por exemplo. Da disciplina de álgebra linear, temos os conceitos de vetores, matrizes (em especial as simétricas), operações algébricas, autovalores e autovetores, conceitos estes fundamentais na análise matricial de estruturas. Da disciplina de pesquisa operacional, herdamos os conceitos de otimização de sistemas, com sua determinação de pontos de máximos e mínimos, conseguindo assim determinar, com a utilização da conceituação da energia potencial total da estrutura, sua situação de mínimo - e conseqüente equilíbrio. Já da mecânica dos sólidos indeformáveis, temos os conceitos de reações de apoio e equilíbrio de forças.

Mas quando discutimos a matéria de elementos finitos, é indispensável que os alunos tenham em mente toda esta teia de informações necessárias para sua formação. Deste modo, o graduando apresenta-se a esta disciplina de uma forma bem preparada, tornando-se capaz de entender mais facilmente os processos envolvidos na resolução dos sistemas estruturais, bem como interpretar mais criticamente os resultados obtidos. Vale ressaltar a este ponto que o objetivo desta matéria não deve se encontrar em discutir a teorização de elementos finitos, tampouco a formulação dos elementos de ordem superior (como os bi e tri-dimensionais). O objetivo deve residir em propiciar ao aluno o uso de uma ferramenta (o software de elementos finitos), com a qual ele pode determinar o comportamento de uma peça ou sistema estrutural. E esta determinação se dá sem que ele necessite conhecer as entranhas da formulação do elemento, mas apenas suas características de aplicação e suas limitações quanto ao uso.

Assim sendo, fica evidente a necessidade de uma ferramenta computacional apropriada - que no caso deste artigo é o software ANSYS. É importante salientar que na teorização da disciplina de elementos finitos é ensinada a formulação de treliças e de barras no contexto da análise matricial de estruturas. Os educandos aprendem como são feitas as construções da matriz de rigidez, do vetor de equilíbrio e do vetor incógnita da estrutura, tanto no sistema de coordenada local quanto global. Além disto, eles aplicam os conceitos adquiridos na disciplina de cálculo numérico para a solução de sistemas de equações lineares e não-lineares.

3. A INTERFACE ENTRE O ENSINO DA TEORIA CLÁSSICA E OS MÉTODOS COMPUTACIONAIS

Como discutido anteriormente, o uso do software de elementos finitos permite ao aluno o desenvolvimento de um maior senso crítico sobre as conseqüências da ação de uma determinada solicitação sobre um sistema estrutural.

Os métodos de resolução de treliças e vigas, conforme propostos pela resistência dos materiais e pela estabilidade das construções, possuem sua aplicação limitada. Quando não uma limitação física devido às restrições na formulação da solução, a limitação pode se encontrar no fator tempo×resultado. Esta relação deve levar em conta o tempo necessário para se calcular um modelo em contrapartida ao resultado obtido. Para ilustrar esta relação, a figura 1 apresenta uma estrutura em forma de uma casca treliçada curva, de diâmetro externo de 6,00m, e com altura de 1,85m.

Este modelo é composto de 168 barras, com área de seção transversal de $7,07 \text{ cm}^2$, conectadas por meio de 73 nós. Todos os nós de sua base (apoios) estão com seus deslocamentos restritos em todas as direções. Aqui é estudada a situação de carregamento onde atua uma carga concentrada de -80kN (em relação ao eixo global de coordenadas), no nó de extremo superior da estrutura.

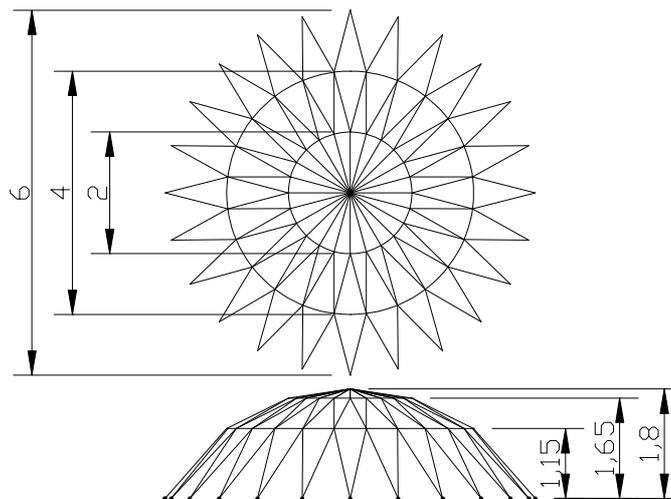


Figura 1 – Exemplo 1: casca treliçada – planta e elevação.

Caso fossemos analisar nó a nó este sistema, utilizando o método dos deslocamentos (por exemplo), seria gasto um tempo e um potencial intelectual tal que, possivelmente, dificultaria a viabilização da solução. Por outro lado, o uso do software de elementos finitos garante uma resposta com precisão, em um tempo significativamente inferior à análise convencional. A figura 2 apresenta a solução, conforme emitida pelo software ANSYS.

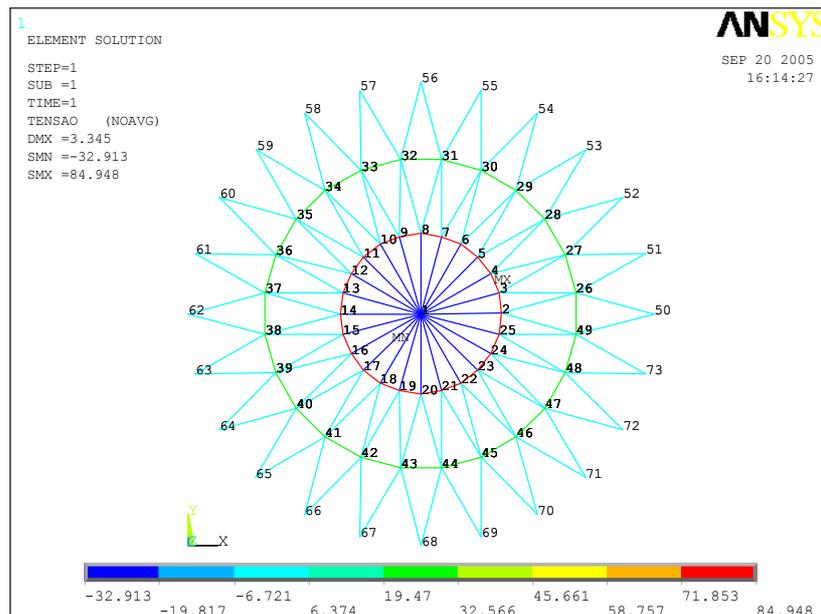


Figura 2 – Exemplo 1: Resultado das tensões nas barras, determinadas pelo software ANSYS.

Outra vantagem que podemos citar do uso do software de elementos finitos encontra-se na possibilidade da determinação de deslocamentos e de situações deformadas de equilíbrio, sem grandes esforços analíticos. Para tanto, tomemos pó exemplo a estrutura de treliça plana apresentada pela figura 3.

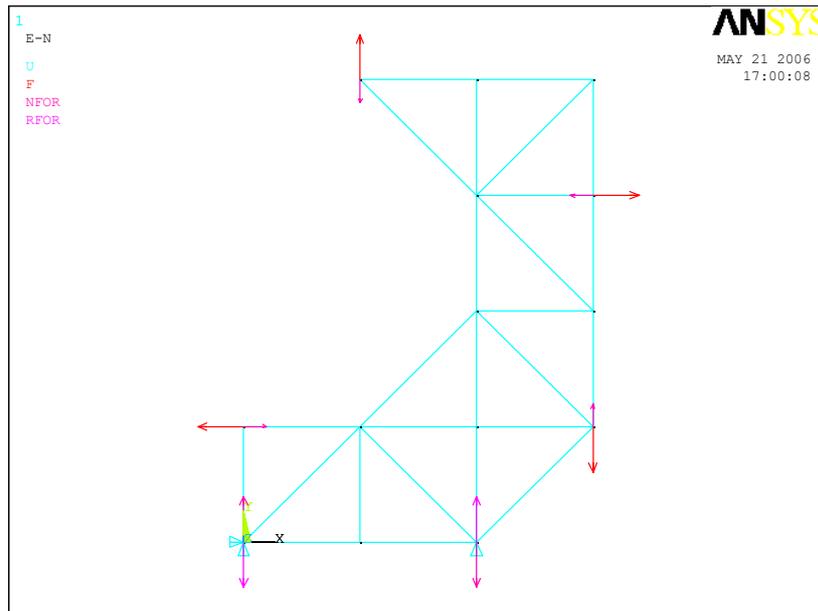


Figura 3 – Exemplo 2: Modelo de treliça plana

Neste exemplo, os nós estão afastados 2m em relação aos nós ao redor. As barras possuem módulo de elasticidade de 200 GPa, e as solicitações externas (representadas na figura anterior pelas setas na cor vermelho), possuem intensidade de 100 kN, e direção e sentido conforme indicados na figura. O uso do software nos permite determinar, de maneira prática, a configuração deformada desta estrutura, conforme apresentado na figura 4.

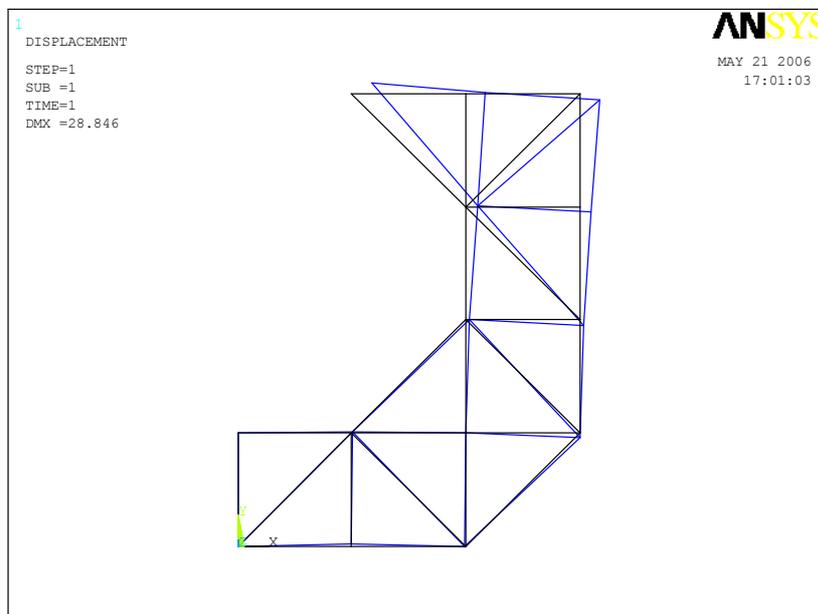


Figura 4 – Exemplo 2: Configuração deformada.

Como é possível notar, a configuração deformada da estrutura, em virtude do carregamento aplicado, não é de imediata definição. Porém, com o uso do software podemos determiná-la e quantificá-la com precisão.

4. A APLICAÇÃO DE FORMULAÇÕES DE ORDEM SUPERIOR, COM O USO DO SOFTWARE ANSYS

A grande vantagem do uso do software ANSYS na graduação, associado ao ensino do método dos elementos finitos, reside na possibilidade, não apenas de aplicar os conceitos desenvolvidos nas disciplinas de resistência dos materiais e estabilidade em sistemas mais complexos. Mas também em permitir o desenvolvimento e a aplicação de outras teorias, mais complexas, sem com isso necessitar o estudo aprofundado de sua formulação.

Um exemplo de teoria a ser discutida são aquelas pertinentes aos sólidos bi-dimensionais, representados pelas cascas e pelas chapas. Cascas e chapas são estruturas espaciais nas quais duas de suas dimensões se sobrepõem à terceira – que é a sua espessura. A grande diferença entre estes dois elementos encontra-se basicamente na direção de aplicação do carregamento. Enquanto nas chapas o carregamento é aplicado na direção paralela à sua superfície média, nas cascas o carregamento pode ser distribuído em sua superfície.

Nas cascas temos duas geometrias básicas: A geometria local - que estuda a superfície, e a geometria global - que estuda a forma da casca. Além disso, as cascas podem ser geradas por rotação ou por translação. As cascas por rotação são determinadas por uma curva que gira em torno de um eixo (eixo de rotação). Já as cascas por translação são geradas por uma curva que se desloca apoiando-se sobre outra curva, mantendo-se constante o ângulo entre elas e o ângulo com o plano vertical, assim a curva se desloca, mantendo-se paralela a si mesma.

A figura 5a apresenta a simulação de um sistema analisado em elementos finitos com o elemento de chapa. Os resultados obtidos apresentam as tensões geradas pelo carregamento solicitante. A figura 5b apresenta modelos de estruturas de cascas.

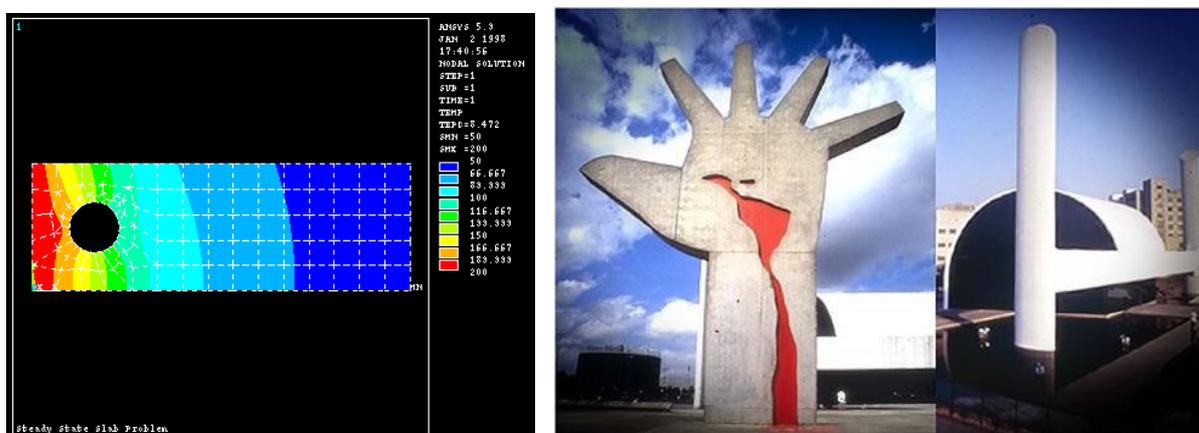


Figura 5a (esquerda) : Simulação de uma chapa no software Ansys. 5b (direita) : Exemplo de construções em formato de casca (Memorial da América Latina – SP).

4 CONCLUSÃO

Analisando as experiências obtidas durante o curso da disciplina de método dos elementos finitos no curso de engenharia civil, pode-se observar que os educandos passam a ter conhecimentos práticos de projetos e de modelagem computacional, tornando-se diferenciados em relação àqueles que não a tiveram.

É indiscutível que os métodos apresentados nas diversas disciplinas de graduação, referentes à análise de estruturas, são basicamente teóricos. Os educandos não visualizam com muita nitidez o comportamento estrutural, uma vez que os métodos são analíticos e requerem muito desenvolvimento de cálculos. Quase sempre, os alunos se confundem durante estes processos de cálculo, perdendo o enfoque sobre os conceitos do comportamento estrutural.

Como consequência da vivência prática do ensino da disciplina, é evidente que os alunos adoram as aulas práticas, uma vez que eles visualizam melhor todo o comportamento da estrutura e, principalmente, desenvolvem o senso crítico sobre os resultados obtidos. Isto é possível através do uso dos recursos computacionais de animação gráfica disponíveis nos softwares de elementos finitos, que possibilitam a visualização dos resultados obtidos durante a análise estrutural, como deslocamentos, tensões, deformações, etc. Desta forma, o aluno vivência a realidade do comportamento estrutural, bem como desenvolvem a interpretação física do problema.

Pedagogicamente, o educando desenvolve um melhor entendimento da teoria estrutural ensinada ao aplicá-la na prática com a utilização de recursos computacionais. Outro fato interessante é possibilitar ao educando vivências práticas de modelagem computacional direcionada ao cálculo de estruturas, entendendo como é realizada a análise numérica dos elementos finitos ensinados na parte teórica da disciplina.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS. **Tutorial para referencial teórico e formulação para versão 9.0.**

BANDEIRA, A. A. **Uma Introdução à Análise de Problemas de Contato**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo São Paulo, 1997. 146p.

BANDEIRA, A. A., CHIVANTE, M. R. P. **A interdisciplinaridade da análise não linear de estruturas na engenharia civil.** In: XXXIII COBENGE – Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 11, 2005, Campina Grande. **Anais**. Paraíba: Formato digital.

BANDEIRA, A. A. **Notas de aula da disciplina de método dos elementos finitos.** 2006.

BEER, Ferdinand e JOHNSTON, Russel. **Resistência dos Materiais.** 3ª ed. São Paulo: Makron Books, 1992. 1255p.

BEER, Ferdinand e JOHNSTON, Russel. **Mecânica Vetorial para Engenheiro: Estática.** 5ª edição revisada. São Paulo: Makron Books, 1994. 793p.

BERTSEKAS, D. P. **Nonlinear programming.** Belmont, Athena Scientific, 1995.

CHIVANTE, M. R. P. **Métodos Numéricos Aplicados à Análise Não Linear de Treliças Espaciais**. Dissertação (Graduação) – Escola de Engenharia, Universidade presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2005, 144p.

LOWMAN, J. **Dominando as técnicas de ensino**. Tradução Harue Ohara Avritscher. São Paulo: Atlas, 2004.

PINTO, D. P; NASCIMENTO, J. L. **Educação em engenharia: metodologia**. São Paulo: Editora Mackenzie, 2002

THE FINITE ELEMENT TEACHING MULTI-DISCIPLINARITY IN THE CIVIL ENGINEERING COURSE: LEARNING AND PEDAGOGICAL ASPECTS USING THE SOFTWARE ANSYS

***Abstract:** This paper presents results obtained during the teaching of the finite elements method subject in the engineering civil course at Universidade Presbiteriana Mackenzie. It is presented the concepts and the multidisciplinary among the finite elements method and other subjects presented in the course. It is also presented an alternative to teach more complete and professional structural systems during the graduation. The students may have this opportunity by using finite elements computational resources, like ANSYS, in the practical part of the subject. At this moment, students are exposed to the structural and computational modelling, and they are also presented to a discussion about the results obtained.*

***Key-words:** Teaching, learning, multidisciplinary, finite elements, computational mechanics.*