



COBENGE 2005

XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia

"Promovendo e valorizando a engenharia em um cenário de constantes mudanças"

12 a 15 de setembro - Campina Grande Pb

Promoção/Organização: ABENGE/UFPE

DEMONSTRAÇÃO DO EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES EMPREGANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NO PROCESSO DE ENSINO NA ENGENHARIA MECÂNICA

Daniel Benítez Barrios – danielbb@mackenzie.com.br

Universidade Presbiteriana Mackenzie, Escola de Engenharia

Rua da Consolação 930

CEP 01302-907 – São Paulo - SP

Edvaldo Angelo – eangelo@mackenzie.com.br

J.I.H. López – jihlopez@mackenzie.com.br

Alfonso Pappalardo Júnior – alfonso@mackenzie.com.br

***Resumo:** Este trabalho apresenta três modelagens, empregando o Método dos Elementos Finitos (MEF), mostrando o efeito da concentração de tensões provocado por mudanças bruscas na seção transversal do elemento mecânico estudado na distribuição das tensões. Foram estudados os casos de uma chapa com um furo no centro, uma chapa com entalhes e uma chapa com uma elipse passante no centro, os três casos de seção retangular. Em todas as modelagens foram aproveitadas as propriedades de simetria dos corpos, o que possibilitou modelar apenas um quarto da peça. O objetivo fundamental deste estudo foi mostrar aos estudantes de engenharia mecânica tanto a parte conceitual do fenômeno da concentração de tensões, como a aplicação do MEF como ferramenta de cálculo, muito utilizada na atualidade no projeto de máquinas e estruturas. São apresentados os campos de tensões obtidos nas diferentes modelagens assim como uma comparação dos valores das tensões obtidos através das modelagens com os valores determinados a partir de fórmulas clássicas disponíveis na literatura. Estes últimos foram determinados empregando um programa feito em C++ Builder, linguagem de programação ministrada aos estudantes nos cursos de Engenharia na Universidade Presbiteriana Mackenzie.*

Palavras-chave: Ensino, Concentração de Tensões, Elementos Finitos, Modelagem

1. INTRODUÇÃO

Na prática da Engenharia, especificamente em projetos de elementos de máquinas e estruturas, o engenheiro mecânico deve prestar especial atenção à presença do efeito de concentração de tensões. Este efeito aparece, fundamentalmente, no caso de mudanças bruscas na seção transversal do elemento, provocando picos de tensões nessa região. Esta alteração nos valores das tensões deve ser considerada na hora de dimensionar, escolher o tipo de material e a geometria da peça a ser projetada, pois, sobretudo no caso de carregamento cíclico, o fato de não considerar este efeito pode conduzir à falha prematura do componente mecânico.

Embora existam manuais e normas elaborados com valores de coeficientes disponíveis para este tipo de análise, o fato de se dispor na atualidade de ferramentas de simulação numérico-computacional empregando métodos numéricos, como, por exemplo, o Método dos Elementos Finitos, possibilita visualizar de maneira clara e precisa a alteração na distribuição dos campos de tensões devido à presença de elementos concentradores de tensões na peça, como furos, entalhes, ranhuras, cortes, etc.

Para o estudante de engenharia, poder visualizar as distribuições de tensões originadas em uma peça onde apareça o efeito da concentração de tensões, empregando modelagens numérico-computacionais, é muito interessante, não somente pela demonstração do conceito, mas também pelo emprego da ferramenta de cálculo, amplamente utilizada na área de engenharia.

As equações elementares empregadas tanto na Resistência dos Materiais como no Projeto de Elementos de Máquinas e Estruturas, pressupõem que os elementos analisados possuem seção transversal constante ou, que a mudança nas dimensões da seção transversal, acontece de maneira gradual. Entretanto, na prática muitas vezes acontece o contrário, como ilustra a figura 1.

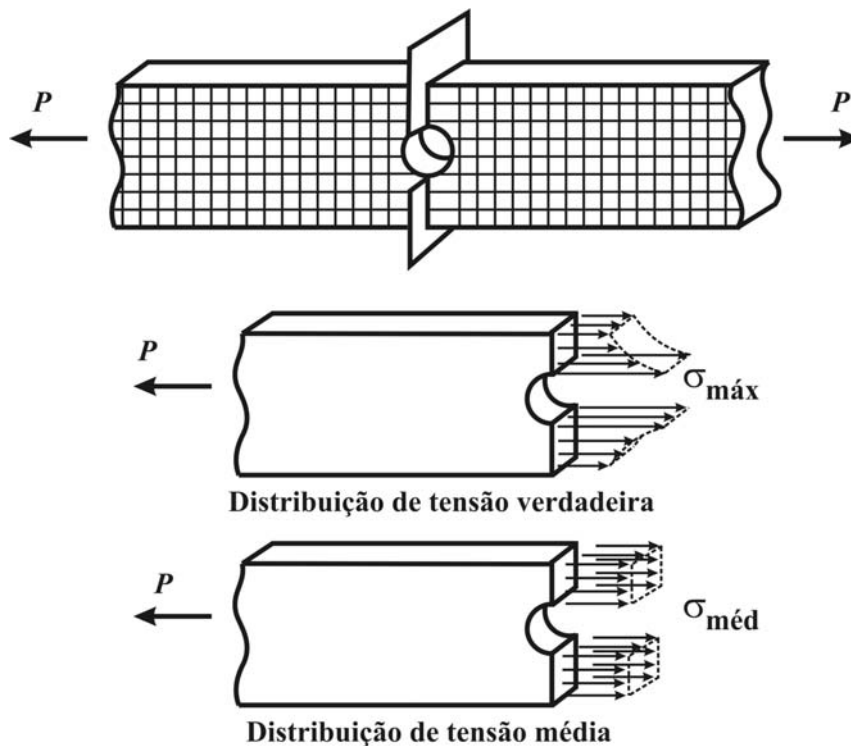


Figura 1 – Efeito da concentração de tensões devido à mudança na seção transversal

A presença de um furo (como ilustrado na Figura 1), provoca uma alteração na distribuição de tensões, aparecendo um pico de tensão definido como tensão máxima, $\sigma_{\text{máx}}$. A tensão média, $\sigma_{\text{méd}}$, será o valor de tensão que desconsidera o efeito da concentração de tensões, sendo determinado como apresentado na Figura 2, HIBBELER (2004).

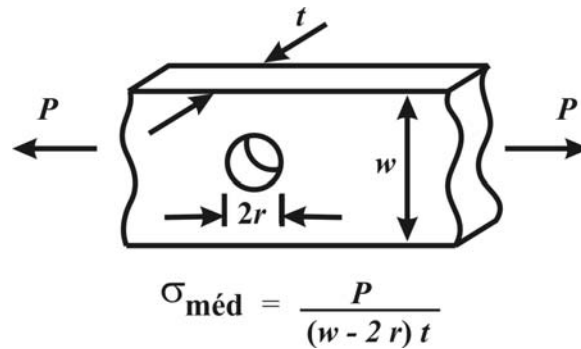


Figura 2 – Cálculo da tensão média desconsiderando o efeito da concentração de tensões

É mostrado aos alunos que, na prática da engenharia, a distribuição de tensão verdadeira não precisa ser determinada. Em vez disso, apenas a tensão máxima nessas seções deve ser conhecida e o elemento é então projetado para resistir a essa tensão quando a força axial P for aplicada. Nos casos em que a área da seção transversal muda, valores específicos da tensão normal máxima na seção crítica são determinados por métodos experimentais ou técnicas matemáticas avançadas que empregam a teoria da elasticidade. Os resultados dessas investigações são fornecidos em forma gráfica por meio do **fator de concentração de tensão K** . O fator K se define como a relação entre a tensão máxima e a tensão média que atuam sobre a menor seção transversal, isto é:

$$K = \frac{\sigma_{\text{máx}}}{\sigma_{\text{méd}}} \quad (1)$$

Desde que K seja conhecido e a tensão normal média ($\sigma_{\text{méd}}$) tenha sido determinada através de $\sigma_{\text{méd}} = P/A$, onde A é a menor área da seção transversal, então, pela equação 1, a tensão máxima na seção transversal é $\sigma_{\text{máx}} = K(P/A)$.

Valores específicos do coeficiente ou fator de concentração de tensões são informados geralmente sob a forma gráfica nos manuais de análise de tensão.

2. MODELAGEM NUMÉRICO-COMPUTACIONAL DO EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES

O primeiro caso estudado apresentado aos estudantes consiste em uma chapa retangular com dimensões de 100 X 50 mm, de espessura 2 mm e com um furo no meio de raio 5 mm, como apresentado na Figura 3. Observadas as possibilidades de simetria, foi modelado apenas um quarto da peça.

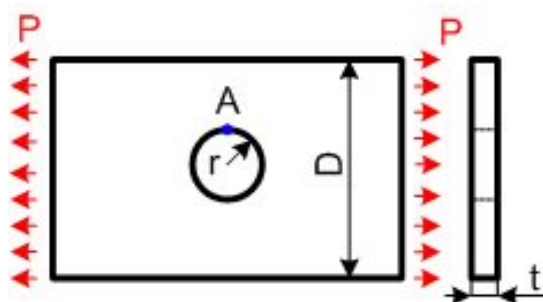


Figura 3 – Chapa retangular com furo no centro

O material empregado para todas as modelagens é aço, supondo um comportamento linear-elástico, com propriedades mecânicas de módulo de elasticidade $E = 2\,00\,000$ MPa e coeficiente de Poisson $\nu = 0.3$. O elemento escolhido foi o denominado “plane 42”, com formulação adequada para estado plano de tensão (EPT) e possibilidades de aceitar valores de espessura. A malha de elementos finitos é apresentada na Figura 4, podendo-se observar o refinamento da mesma na região correspondente ao concentrador de tensões.

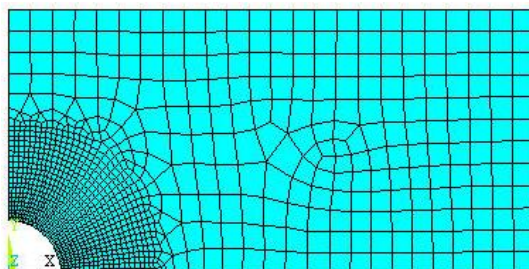


Figura 4 – Malha de elementos finitos para o modelo da chapa com furo no centro.

A Figura 5 descreve o carregamento aplicado, neste caso uma carga distribuída de tração, assim como as condições de contorno, levando em consideração a simetria do modelo.

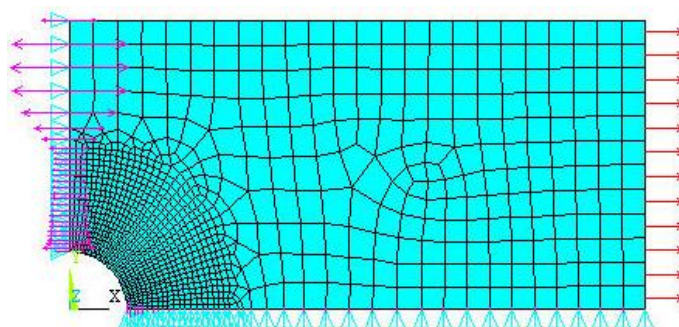


Figura 5 – Malha de elementos finitos, condições de contorno e carregamento.

A Figura 6 ilustra a distribuição de tensões provocada pelo carregamento axial, identificando-se claramente o efeito da concentração de tensões na região do furo.

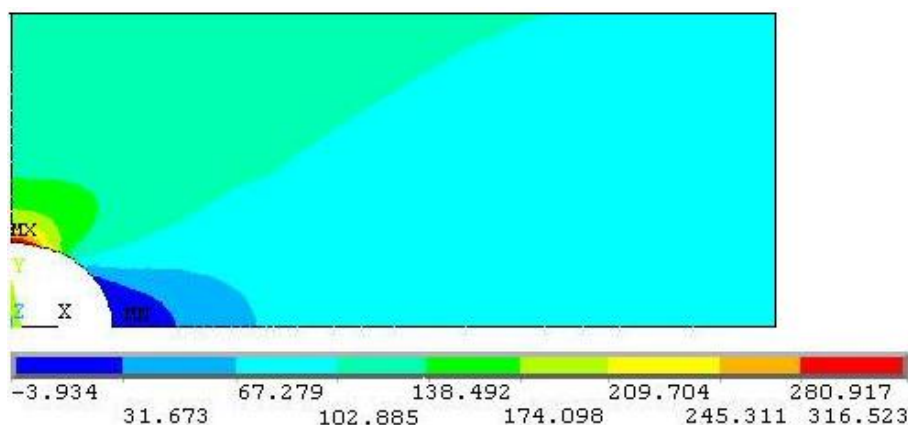


Figura 6 – Distribuição de tensões σ_x para o modelo ModCob1 (MPa)

O segundo caso estudado apresentado aos estudantes consiste em uma chapa retangular com dimensões de 100 X 50 mm, de espessura 2 mm e com entalhes de raio 5 mm, como apresentado na figura 7.

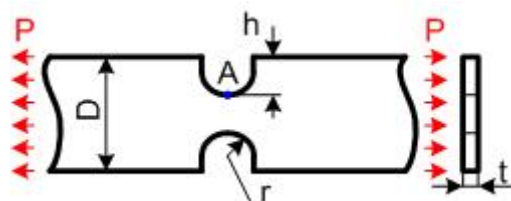


Figura 7 – Chapa retangular com entalhes

A Figura 8 apresenta a malha de elementos finitos, as condições de carregamento e contorno para o modelo ModCob2.

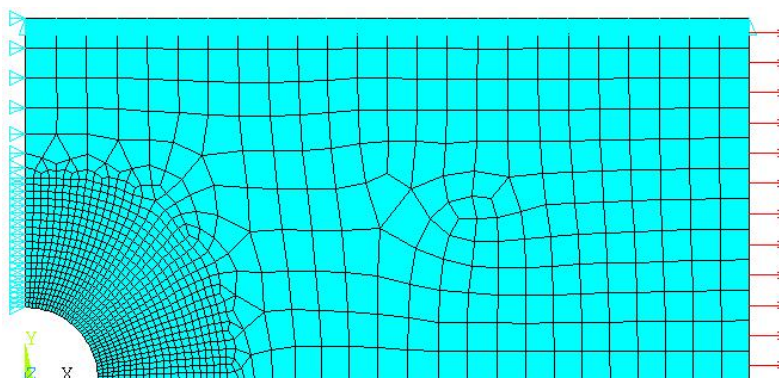


Figura 8 – Malha de elementos finitos, carregamento e condições de contorno para o modelo da chapa com entalhe (modelo ModCob2)

A Figura 9 ilustra a distribuição de tensões provocada pelo carregamento axial, identificando-se claramente o efeito da concentração de tensões na região do entalhe.

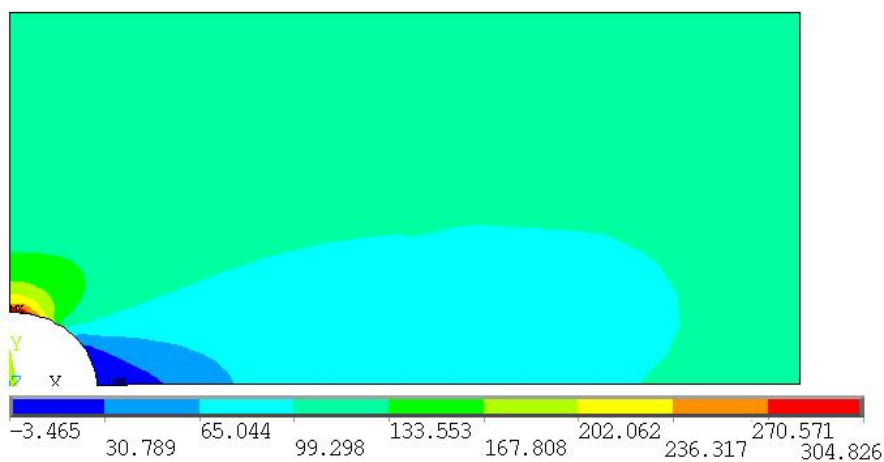


Figura 9 – Distribuição de tensões σ_x para o modelo ModCob2 (MPa)

O terceiro e último caso estudado para ser apresentado e discutido com os alunos consiste em uma chapa retangular com dimensões de 100 X 50 mm, de espessura 2 mm e com uma elipse de raio maior e menor de 8 e 4 mm respectivamente no centro, como apresentado na Figura 10.

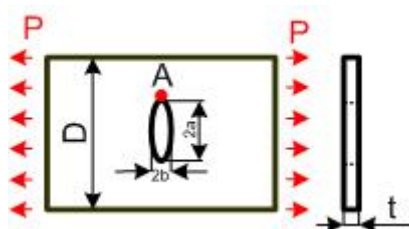


Figura 10 – Chapa retangular com entalhes.

A Figura 11 apresenta a malha de elementos finitos, as condições de carregamento e contorno para o modelo ModCob2.

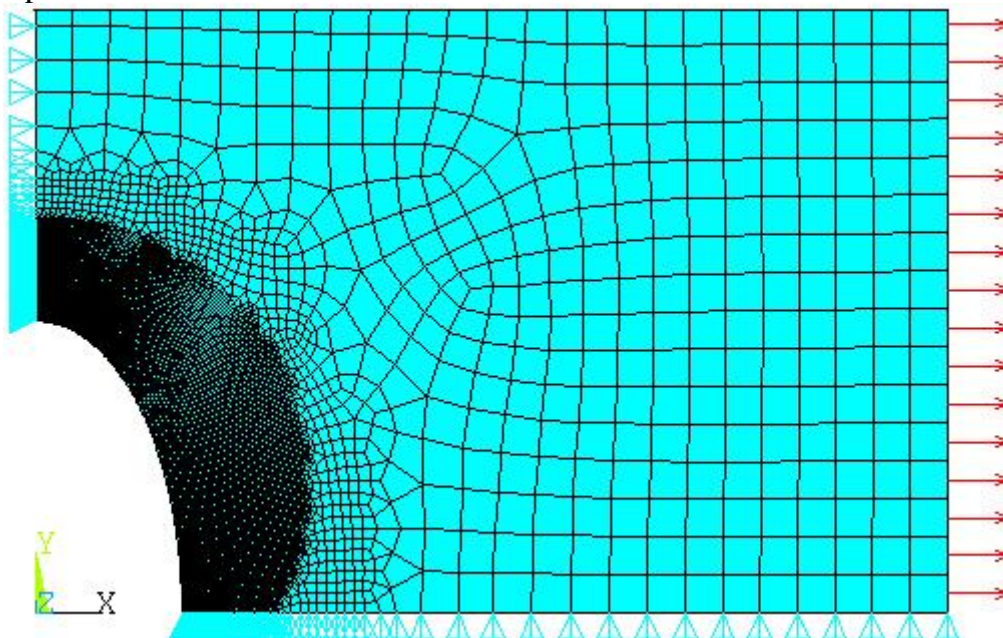


Figura 11 – Malha de elementos finitos, carregamento e condições de contorno para o modelo da chapa com elipse passante (modelo ModCob3)

Na figura anterior pode ser observado que, na região de concentração de tensões foi empregada uma quantidade muito maior de elementos, com o objetivo de poder registrar de maneira mais fiel o efeito da mudança no campo de tensões.

A Figura 12 ilustra a distribuição de tensões provocada pelo carregamento axial, identificando-se claramente o efeito da concentração de tensões na região do elemento concentrador de tensões.

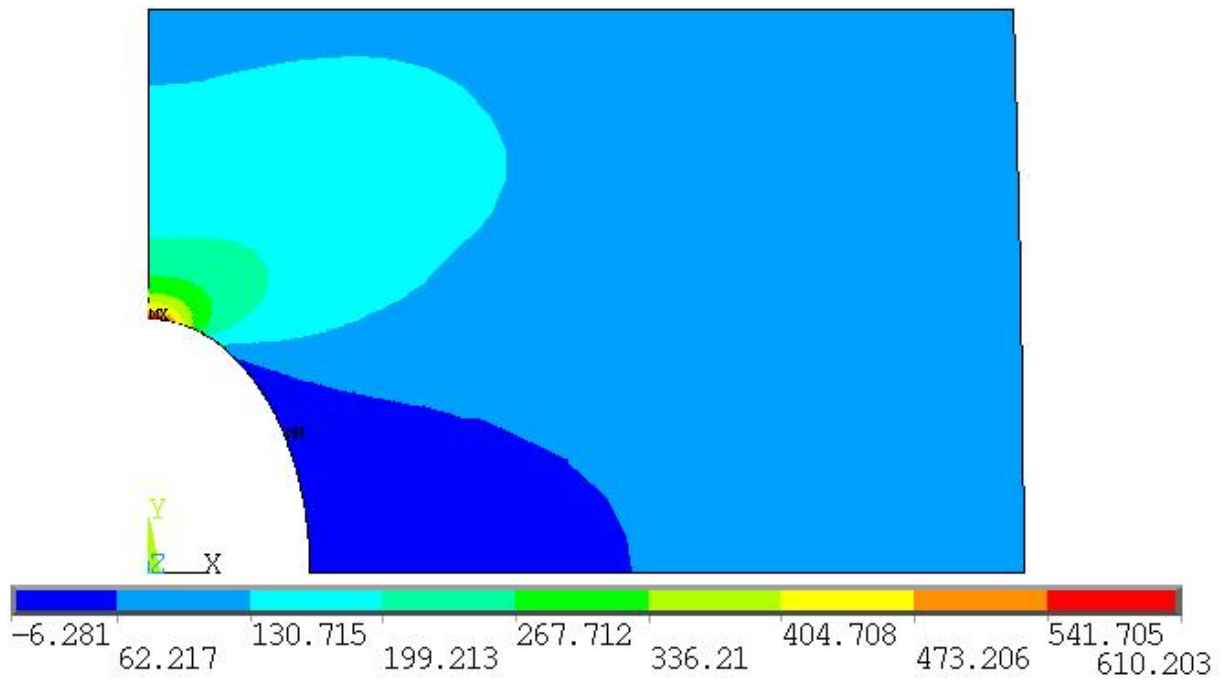


Figura 12 – Distribuição de tensões σ_x para o modelo ModCob3 (MPa).

Calculo do fator de concentração de tensões k e da tensão máxima

Geometria	Parâmetros	fator k	tensão máxima (MPa)
	D = 50 r = 5 t = 2 P = 10000	2.5082	313.5200
	D = 50 r = 5 t = 2 h = 5 P = 10000	2.4183	302.2890
	D = 50 t = 2 a = 8 b = 4 P = 10000	3.7335	549.0514

Botões: Calcular, Limpar, Sair

Figura 13 - Interface gráfica do programa empregado para o cálculo do coeficiente de concentração de tensões e do valor da tensão máxima.

A tabela a seguir apresenta a comparação dos resultados de tensões máximas oferecidos pelos modelos ModCob1, ModCob2 e MosCob3 e pelas equações clássicas disponíveis na literatura, YOUNG (1989) para o ponto A mostrado nas figuras 3, 7 e 10. Neste ponto aparecem as máximas tensões para o carregamento aplicado. Os valores das tensões oferecidos pelas equações clássicas foram obtidos utilizando um programa construído em linguagem C++ Builder, PAMBOUKIAN et al (2004).

Esta linguagem de programação é ministrada a todos os estudantes dos cursos de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie. A concepção deste programa, que permite calcular o valor do coeficiente de concentração de tensões assim como o valor da tensão máxima para as configurações estudadas no presente trabalho, serve como demonstração aos estudantes da interação multidisciplinar no processo de ensino e na área de Engenharia.

A interface gráfica do programa, a qual permite visualizar os valores do coeficiente de concentração de tensões K e da tensão máxima para cada situação discutida é apresentada na Figura 13.

Tabela 1 – Comparação entre os resultados teóricos e da modelagem utilizando o MEF

Modelos	Resultados do modelo (Tensão máxima, MPa)	Solução clássica (Tensão máxima no ponto A, MPa)
ModCob1	316,523	313,520
ModCob2	304,826	302,289
ModCob3	610,203	549,051

Observando a Tabela 1 pode ser apreciada uma elevada correspondência entre os valores das tensões máximas determinadas empregando-se o MEF e os valores fornecidos pela literatura especializada. Os alunos podem apreciar que, no caso dos modelos ModCob1 e ModCob2, a diferença entre os resultados não chega a atingir 1 % de erro. Entretanto para o modelo ModCob3, essa diferença é significativa, embora o valor da tensão máxima fornecida na literatura encontra-se na faixa das tensões máximas fornecidas pela modelagem.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do emprego do Método dos Elementos Finitos e utilizando um software comercial de cálculo, neste caso o ANSYS versão 7.0 para Universitários, disponível na Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, é possível demonstrar aos estudantes de engenharia como solucionar problemas da prática empregando os modernos recursos computacionais. É muito importante, sobretudo na primeira fase de introdução destes recursos aos alunos, solucionar exemplos simples, onde a solução teórica seja conhecida. Isto possibilita enfatizar tanto a parte conceitual do fenômeno como também a parte que concerne ao domínio do software.

O uso incorreto de qualquer software pode trazer como consequência erros graves no desenvolvimento de um determinado projeto de engenharia. É por isso que se deve tomar um cuidado especial na hora de descrever aos estudantes as diferentes etapas que levam à construção de um modelo numérico computacional: Etapa de pré-processamento (escolha do elemento finito adequado ao problema proposto, geometria do modelo, condições de contorno, carregamento e propriedades mecânicas do material); Etapa de processamento ou cálculo e Etapa de pós-processamento (análise e interpretação de resultados).

O computador surgiu como uma opção a mais na busca da melhoria da qualidade do ensino. Nem todas as formas de uso de computador no ensino se prestam bem para atingir certos objetivos educacionais. Mas, o emprego das técnicas computacionais pode trazer resultados pedagógicos benéficos, desde que se planeje corretamente o seu uso e recursos humanos sejam devidamente qualificados, CHAMBERLAIN et al (2005).

Não é difícil mostrar o quanto o computador pode auxiliar a tarefa da prática ou ensino da engenharia. O educador de engenharia deve visualizar a informática como uma aliada para organizar as aulas (através de editores de texto, programas de apresentação, etc.), e melhorar o desempenho de suas atividades (através de programas educacionais específicos do conteúdo abordado). Em último caso, poderá desenvolver programas que o ajudem a disseminar mais efetivamente os conceitos fundamentais do comportamento dos sistemas estudados.

Neste trabalho, o programa criado para obter os valores do coeficiente de concentração de tensões e da tensão máxima permite aos alunos reconhecer as potencialidades das ferramentas de lógica e linguagem adquiridas no curso, assim como visualizar a interação entre várias disciplinas, tanto do ciclo básico quanto do específico.

O emprego racional das modernas técnicas computacionais durante o processo de formação dos jovens engenheiros, com certeza irá contribuir para uma melhor formação profissional e um melhor desempenho perante as exigências do mercado de trabalho no atual cenário mundial.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte oferecido pela Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS User's Manual, 2005.

CHAMBERLAIN PRAVIA, Z. M; KRIPKA, M. **Proposta Metodológica para o uso e desenvolvimento de ferramentas computacionais no ensino de estruturas**. Rio Grande do Sul. <http://www.ertools.upf.br/pub/q126.pdf>. Acessado em 29 de maio de 2005.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

PAMBOUKIAN, S. V. D.; ZAMBONI, L. C.; BARROS, E. A. R. **C++ Builder para Universitários**. 2ª edição, São Paulo: Páginas & Letras, 2004

YOUNG, W. C. **Roark's Formulas For Stress and Strain**. McGraw-Hill, 1989.

Abstract: *This work presents three models, employing the Finite Element Method (FEM), showing the effect of the stress concentration caused by brusque changes in the transversal section of the studied mechanical element on the stress distribution. The cases studied were: a plate with a hole in the center, a plate with notches and a plate with a passing ellipse in the center, being the three cases rectangular section. The properties of symmetry were considered at all cases, which made possible to model only one quarter of the piece. The main objective of this study was to show to the mechanic engineering students both the conceptual part of the phenomenon of the stress concentration, as well as the application of the FEM as a calculation tool, widely used in nowadays in the project of machines and structures. The obtained stress fields for the three models and the comparison between the values of the stress determined by the modeling and the values calculated from available classic formulas in specialized literature are presented. These last ones had been determined using a program made in C++ Builder, programming language presented to the students during the courses of Engineering at the Mackenzie Presbyterian University.*

Keywords: Education, Stress concentration, Finite Element, Modeling