



COBEM 79
V CONGRESSO BRASILEIRO DE
ENGENHARIA MECANICA

CAMPINAS, 12-13-14 e 15

DEZEMBRO 1979



TRABALHO TÉCNICO
 TECHNICAL PAPER

N.º DT-02

P.P. 078 - 087

ARQUITETURA DE UM SISTEMA MODULAR DE ELEMENTOS FINITOS

I - CARACTERÍSTICAS

Clóvis Sperb de Barcellos

Prof. Titular - Depto. Eng. Mecânica
 CT/UFSC - Florianópolis - SC - Brasil

Edison da Rosa

Prof. Assistente - Depto. Eng. Mecânica
 CT/UFSC - Florianópolis - SC - Brasil

Sumário

Neste trabalho são apresentadas algumas das características da arquitetura de um sistema modular de elementos finitos, ora em desenvolvimento. Os objetivos globais do sistema, além da solução de problemas, são de caráter de pesquisa e didáticos. A modularidade é usada para permitir ampla flexibilidade para a inclusão e pesquisa de novas formulações quer de elementos quer de processos numéricos de solução. A finalidade didática é atingida pela identificação das várias etapas inerentes ao método e pelo grau crescente de sofisticação do uso das memórias principal e secundária.

Summary

Some of the properties of a finite element modular system currently under development is present. It was implemented for research and teaching purposes, besides its use for problem solving capabilities. The modularity is used for allowing a great flexibility for the inclusion and research of new element formulations as well as improved numerical solution procedures. Its adequacy for teaching use is obtained by the easy identification of the program steps and by the growing in the main and secondary memory utilization.

1. Introdução

Neste artigo é apresentado um relatório inicial de um sistema que está sendo desenvolvido com o objetivo de criar uma infraestrutura computacional para o ensino e pesquisa em Mecânica dos Meios Contínuos através de técnicas de elementos finitos.

O trabalho aqui descrito surgiu da necessidade de absorção e dissiminação da tecnologia do Método de Elementos Finitos, visto que, a maioria dos programas em uso no Brasil são de origem estrangeira, com poucas exceções, como o PROASE [2], e o LORANE [6]. A maior parte dos programas disponíveis não são adequados para o ensino do Método dos Elementos Finitos, bem como para a sua alteração com o fim de pesquisar novas formulações ou novas utilizações do método. Para preencher essas lacunas, o presente sistema possui finalidades múltiplas, ou seja, didática, pesquisa e comercial. O seu uso para atividades didáticas será de familiarizar o estudante a compreender e identificar a estrutura de um sistema, a partir de conhecimentos teóricos já adquiridos. Quanto à pesquisa, será usado para a formulação de novos elementos, estudo de convergência, pesquisa de novos procedimentos numéricos, etc. Na parte comercial, o sistema poderá ser usado para a resolução de problemas da mecânica sólida, fluida e térmica, bem como acoplamentos entre si.

Para cumprir estas finalidades, o desenvolvimento do presente sistema é acompanhado de uma ampla e minuciosa documentação, tanto no que se refere à metodologia numérica como de programação. Isto é essencial para o ensino do Método de Elementos Finitos, bem como para a pesquisa e aprimoramento do sistema.

2. Problemas solúveis pelo Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos foi inicialmente formulado para solucionar problemas estruturais elásticos, tendo atualmente expandido o seu campo de atuação para uma ampla gama de problemas da Mecânica dos Meios Contínuos. Estes problemas diferem quanto ao meio sobre o qual está defi

nido o domínio, bem como quanto às equações diferenciais ou princípios variacionais que regem o fenômeno que se realiza neste meio. Consequentemente existe uma gama bastante variada de problemas resultantes das possíveis combinações meio contínuo-fenômeno.

O método se baseia na partição do domínio, a qual fornece a forma geométrica dos elementos finitos, na definição de funções de interpolação adequadas sobre esses elementos e através do uso de um princípio variacional, ou balanço energético ou ainda, o método de Galerkin. Um grande número de problemas da Mecânica dos Meios Contínuos, quando atacados por este método, resultam em sistemas de equações de um dos seguintes formatos:

$$K X = F \quad (1)$$

$$C \dot{X} + K X = F \quad (2)$$

$$M \ddot{X} + C \dot{X} + K X = F \quad (3)$$

Exemplificando, temos os tipos de problemas abaixo indicados, que recaem em sistemas de equações simultâneas do formato (1), (2) ou (3) respectivamente.

Formato (1): Problemas elásticos, elasto-plásticos, condução de calor.

Formato (2): Condução de calor em regime transiente, problemas de fluência, instabilidade.

Formato (3): Problemas de elasto-dinâmica, acoplamento fluido-estrutura.

Os programas para a resolução destes problemas apresentam partes que são inerentes à combinação meio contínuo-fenômeno, enquanto que outras são inerentes ao método. Desta última, algumas são usadas em problemas de qualquer um dos formatos enquanto outras são específicas ao formato e/ou ao processo de solução em questão. Existe, portanto, a conveniência de construir sistemas modulares para tirar proveito das similaridades e distinções existentes entre os diversos tipos de problemas da Mecânica dos Meios Contínuos e

entre os diversos processos para a solução de tais problemas. Tal pode ser exemplificado pelo uso de um domínio que é inicialmente analisado quanto ao campo de temperatura existente, seja regime transiente ou estacionário, sendo estes resultados usados para obter o campo de tensões térmicas, sobre o mesmo domínio.

3. Características necessárias

De forma a cumprir de uma maneira completa os objetivos, o sistema deve possuir uma série de características sendo que uma das principais delas é a modularidade do conjunto.

Uma lista das características desejadas do sistema, com um detalhamento das implicações que cada uma destas fornece, permite a apreciação dos objetivos finais para o sistema.

Modularidade

De um modo geral qualquer programa de elementos finitos, pode ser encarado como um processo de solução para uma certa classe de problemas do contínuo. Neste processo de solução existem diversos procedimentos para gerar a geometria, calcular as matrizes de comportamento dos elementos, montagem do sistema global, solução deste, etc. Partes desses procedimentos são inerentes ao problema físico em questão, ou seja, dependente do meio onde se situa o domínio e dependente do princípio físico que rege o fenômeno. Outras partes podem ser classificadas como inerentes ao Método de Elementos Finitos propriamente dito, como as necessárias para resolver o sistema final de equações simultâneas, para manipulação de informações, etc. As partes que são inerentes ao procedimento, podem ser usadas em qualquer tipo de problema do mesmo formato, que seja resolvido por elementos finitos. Por outro lado, as partes que dependem do meio já são de uso restrito a classes de problemas de interesse para esse meio.

A constatação do fato de que o processo de resolução de diferentes classes de problemas por elementos finitos

possui inúmeras partes operacionais comuns, leva naturalmente ao conceito de modularidade do sistema, de forma a aproveitar as mesmas partes comuns do programa, em diferentes problemas. Em uma arquitetura de programação deste tipo, onde se deseja o maior uso possível de partes comuns, a menor unidade em que o processo pode ser dividido é o módulo.

Um módulo pode ser então definido como um conjunto estanque de subrotinas ou funções, programado para executar uma tarefa específica. Esta programação é realizada sem ter em vista a resolução de um problema específico, mas sim a possibilidade de ser empregado em qualquer tipo de problema cujo processo de solução requer esse tipo de tarefa.

A constituição modular do sistema permite que este apresente uma grande flexibilidade, tanto no que diz respeito à inclusão de novas formulações como permite um desenvolvimento em paralelo de diferentes módulos, respeitando apenas a estrutura de armazenamento de dados. Permite ainda que outros módulos sejam usados em determinados problemas, quando são mais eficientes do que outros.

Expansibilidade

A estrutura modular do sistema permite que este seja facilmente expandido para o uso de diferentes elementos, dentro da mesma classe de problemas. A expansão para o uso de outras técnicas numéricas fica também bastante facilitada. Em uma pesquisa mais avançada, o sistema pode servir de suporte para o desenvolvimento de novos métodos de análise de problemas da Mecânica dos Meios Contínuos, diverso do Método de Elementos Finitos, usando porém as suas vantagens, procurando eliminar as desvantagens.

Confiabilidade

A margem de que erros de lógica passem de uma forma despercebida fica bastante restrita, já que sendo os módulos estanques, estes podem ser facilmente testados e verificados, reduzindo assim o trabalho de depuração do programa.

Portabilidade

O sistema está sendo desenvolvido de forma a possibi-

litar o uso em computadores de médio porte, com capacidade de memória interna da ordem de 200 k bytes. Deste modo o sistema é portátil, no sentido em que pode ser facilmente instalado em praticamente qualquer equipamento de computação cuja capacidade seja ao menos a citada. Outro fator que permite esta portabilidade é que todo o sistema está programado em FORTRAN IV, linguagem disponível em praticamente todos os computadores de porte.

Refino de precisão

O Método de Elementos Finitos é um processo numérico onde existem diversas fontes de erros, que fazem com que o resultado obtido não seja exatamente a solução do problema. Uma das fontes de erro é a aproximação feita para a variável incógnita pelas funções de interpolação, dentro do domínio do elemento. Uma forma usual de melhorar os resultados é o refino da malha, que leva, no limite, à solução exata. Tal no entanto é um processo extremamente trabalhoso, pois é necessário que parte dos dados referentes à conectividade e coordenadas sejam refeitos. O sistema aqui apresentado usa elementos de segunda geração [9], os quais permitem alterar o grau de aproximação da solução sem alterar a malha de elementos finitos. O processo utilizado é de permitir que um dado elemento possa usar funções de interpolação de ordem maior, pelo uso de parâmetros não nodais, os quais são depois eliminados por uma compactação da(s) matriz(es) do elemento. O usuário do programa pode especificar a ordem da função de interpolação, em cada elemento, para cada uma de suas dimensões.

Flexibilidade

A estrutura do programa permite que este seja facilmente modificado ou adaptado para trabalhar com outros meios, bem como permite uma mudança na técnica de solução de uma forma bastante simples. Outro aspecto da flexibilidade é o que diz respeito aos formatos disponíveis para o relatório dos resultados que pode ser especificado pelo usuário, como quais as informações que devem constar ao nível de cada elemento.

Didatismo

Uma das finalidades do sistema é o ensino do Método de Elementos Finitos. Desta forma o sistema procura ser o mais didático possível, o que com a modularização permite a identificação imediata dos diversos passos de processamento inerentes ao método.

A programação é feita também com esta preocupação, sendo a sofisticação desta, feita de uma maneira progressiva. Assim, nas primeiras partes do programa, onde o volume de informações a manipular não é muito elevado, é usada uma maneira simples de trabalhar com os arquivos onde são mantidos os dados ou resultados intermediários. Conforme o volume de informações aumente, o uso da memória principal deve ser otimizado e assim a estrutura de uso dos arquivos e buffers passa a ser mais complexa. Deste modo o aluno vai se inteirando da forma de programação exigida por um sistema de grande porte.

Macro-programação

A característica de macro-programação consiste em permitir, através dos cartões de dados, definir o conjunto de módulos que constituirão o procedimento de ser processado. Isto permite ao usuário definir os módulos do sistema necessários à solução de seu problema, bem como facilita a preparação dos dados, desde que de forma coerente.

Compactabilidade

A propriedade de compactabilidade de um sistema se torna importante quando se deseja, a partir dos módulos ou subrotinas do sistema, obter um programa de aplicações específicas. Algumas vantagens destes programas, são a de que requerem uma confecção de dados mais simples, bem como possuem um tempo de processamento bastante inferior do que seria consumido com o uso do sistema geral.

Elementos cópia

Uma outra característica do sistema que permite reduzir o tempo de execução de um problema, consiste em tirar proveito da existência de elementos com igual configuração

geométrica e de carregamentos volumétricos (gradientes térmicos ou força de massa). Para isto, informações adequadas devem ser fornecidas para definir quais são os elementos bases e quais são os elementos cópias, bem como de que elementos esses são cópias. A economia de tempo decorre do fato de que esses elementos tem a mesma matriz de rigidez e os mesmos vetores de forças equivalentes devido aos carregamentos volumétricos.

4. Fase inicial do sistema

O sistema está sendo atualmente desenvolvido para solução de problemas elasto-estáticos e condução de calor em regime permanente, admitindo ambas propriedades dos materiais variáveis ponto a ponto. Devido à modularidade, toma-se quase que de imediato a extensão a outros tipos de problemas do Formato (1), como por exemplo, para fenômenos regidos pela equação de Helmholtz. Para isso, a biblioteca de elementos está sendo inicialmente dimensionada para comportar:

- a. família de elementos volumétricos: hexaedros de 32, 20 e 8 nós, sólidos de revolução de 4 e 8 nós.
- b. família de elementos bidimensionais: placas e cascas de 4, 8 e 12 nós e cascas de revolução de 2 a 4 nós.
- c. família de elementos uni-dimensionais: hastes e vigas retas e curvas, tubos pressurizados retos e curvos.

As pesquisas programadas para um futuro próximo se concentrarão em funções de interpolação adicionais e alternativas para a análise de precisão, e novas formulações para elementos de casca, incluindo cascas espessas, através de formulações mais elaboradas baseadas na Teoria de Cascas. Paralelamente, o sistema será ampliado para permitir análise dinâmica de problemas do contínuo, através da análise modal e procedimentos iterativos.

5. Conclusões

Devido ao fato de que o emprego do Método de Elementos Finitos tem sido aplicado a uma gama de problemas cada vez mais ampla, e que os sistemas disponíveis são aplicá-

D-000

veis a alguns tipos de problemas da Mecânica dos Meios Contínuos, surge então a necessidade de se dispor de pessoas e de infraestrutura computacional adequada à análise e programação de novos sistemas para resolver problemas que não podem ser resolvidos pelos sistemas disponíveis. Esses sistemas, obviamente, não devem ser unicamente orientados para a solução de problemas técnicos, mas também propiciar, como ferramenta, pesquisas em áreas do contínuo.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, e à Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, que deram suporte para a realização do trabalho.

Bibliografia

- [1] Abdulrahman, H.O., ISA, Iterative stress analysis University of Illinois Report, UILU - Eng-76-2028.
- [2] Alves, D.B., Programa Analisador de Sistemas Estruturais, III COBEM, Rio de Janeiro, pp. 1067-1078, (1975).
- [3] Bathe, K.J.; Wilson, E.L., Numerical methods in finite element analysis, Prentice Hall, (1976).
- [4] Cook, W.A., Ingen: A general purpose mesh generator for finite element codes. Los Alamos Scientific Laboratory report LA-7135-MS.
- [5] Drysdale, W.H.; Zak, A.R., Structural problems in thick shell. Thin shell structures, Ed. by Y.C. Fung and E.E. Sechler, Prentice Hall (1974).
- [6] Ferrante, A.J., The Lorane system, Chapter 13 in the finite element technique, Ed. by Brebbia, C.A. Ferrante, A.J.; UFRGS (1975).

- [7] Jones, Jr. R.F., A curved finite element for general thin shell structures. Nuclear Engineering and Design 48(1978), 415-425.
- [8] Nagy, D.A., Software engineering for finite element analysis, Journal of the Structural Division, ASCE, August, (1978), pp. 1287-1298.
- [9] Szabo, B.A., A second generation finite element computer program for stress analysis. 3rd. Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, London (1975) - North Holland.
- [10] Zienkiewicz, O.C., The finite element method, McGraw-Hill (1977).