

Série i-[cae] 001 Computer Aided Design (icae001.pdf) dezembro/2000

Modelos e a Interpretação CAE

Parte 1

Algumas questões importantes quanto ao uso e a Implantação da Tecnologia CAE

Método dos Elementos Finitos

prof Eng Avelino Alves Filho
diretor do NCE, Núcleo de Cálculos Especiais

www.cadware.com.br

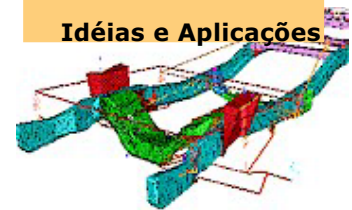
CET- Cursos e Tutoriais via Internet

Copyright © 2000, 2001 CADware® Publishing Brazil
cae@cadware.com.br

MEF

Base Conceitual para o Método dos Elementos Finitos
Recurso de apoio à Engenharia

Idéias e Aplicações



Na forma de perguntas e respostas são discutidas as principais idéias do Método dos Elementos Finitos e suas aplicações. Aqui você consegue uma visão panorâmica do que é o método e onde se aplica, e até os cuidados a serem tomados no processo de implantação da tecnologia CAE.

CADware

Algumas questões importantes quanto ao uso e a Implantação da Tecnologia CAE Método dos Elementos Finitos

De forma simples, qual é a idéia principal do Método dos Elementos Finitos, uma das mais poderosas ferramentas de Análise e que vem sendo utilizada de forma crescente como recurso de apoio à engenharia (“CAE – Computer Aided Engineering”)?

Ao tentar compreender o comportamento dos sistemas, é próprio da mente humana querer subdividi-los em seus componentes individuais, ou mais propriamente, em seus elementos. A partir do entendimento do comportamento de cada elemento individual, poder-se-á entender o funcionamento do conjunto, por mais complexo que possa parecer. Ou seja, **reconstruir o todo, entendida as partes!** Para um engenheiro, um técnico em geral, este constitui um caminho natural para a abordagem de seus problemas. Esta é de forma simples a principal idéia do Método.

Poderíamos exemplificar essa idéia de forma prática?

Em muitas situações práticas, a identificação dos componentes de um sistema, ou mais particularmente de uma Estrutura, parece-nos uma tarefa quase que óbvia. Por exemplo, para uma Estrutura Espacial Metálica constituída unicamente por vigas, e que observamos em muitos pavilhões, é natural identificar **os componentes individuais de vigas, ou elementos**, que conectados entre si unicamente nas juntas ou nós estruturais, constituirão o Conjunto Estrutural.

E qual é o caminho para entender o comportamento do conjunto estrutural?

Neste caso está presente outra idéia bastante comum, e que torna-se fundamental na Análise Estrutural: é a idéia de **rigidez**. Todos nós temos a idéia de “rigidez” desde as primeiras aplicações com os elementos elásticos (ou molas) da Física Básica. O conceito de Mola Equivalente (ou Rigidez Equivalente) a um conjunto de molas, também faz parte do dia-a-dia do técnico, permitindo avaliar o comportamento do conjunto. Assim ocorre também ao abordarmos a Análise Estrutural. A “rigidez da estrutura inteira” depende da rigidez de cada um de seus elementos. Pode-se **montar a rigidez da estrutura a partir da rigidez de cada elemento!** Essa é de modo simples, a primeira idéia do **Método dos Elementos Finitos**: A estrutura, o componente mecânico, ou de forma geral o “corpo contínuo” é subdividido em um **número finito de partes - os elementos** - que são conectados entre si por intermédio de **pontos discretos** - que são chamados de **nós**. A estrutura então pode ser **representada** como uma **montagem de elementos** que constitui um **modelo matemático**, também chamado de **modelo estrutural** ou **idealização estrutural**.

Essa idéia aplica-se de modo geral para os mais diversos tipos de estruturas, de geometria muito mais complexa que as “simples” estruturas metálicas reticuladas?

Sim. Há no dia-a-dia das aplicações mecânicas, diversos componentes que apresentam características bastante diferentes de estruturas constituídas apenas por vigas. A caixa estrutural completa de um veículo, componentes de um chassi, pára-choques, eixos, componentes de máquinas, carcaça de diferencial, etc.

Nestes casos, o “corpo contínuo” é **subdividido artificialmente** em um certo **número finito de elementos**, também conectados nos **nós**. Ou seja, estamos fazendo uma representação aproximada da peça contínua.

A subdivisão desses componentes em elementos, constitui um processo automatizado que é decidido internamente pelo software de elementos finitos?

Não. Embora os recursos gráficos de geração de elementos disponíveis nos softwares de análise, sejam atualmente bastante poderosos, a ação do engenheiro de análise é vital. É interessante observar dois aspectos iniciais, que dependem fundamentalmente da decisão do engenheiro, e que constituem as **características principais do Método dos Elementos Finitos**:

- 1) a subdivisão da estrutura em elementos, isto é, a “malha” de elementos finitos;
- 2) a escolha do elemento apropriado para modelar uma dada situação física.

A escolha do **tamanho adequado da conhecimento das propriedades do elemento escolhido** para representação do problema, que é a **mais fundamental característica do Método**. Acreditar que o software tome essa decisão pelo analista, constitui uma temeridade. Lamentavelmente, em alguns casos, utiliza-se o software com essa visão. A decepção, na obtenção de resultados, é certa.

Em termos práticos, como o analista estrutural “conversa” com o programa de elementos finitos para montar um modelo, como procede na escolha dos tais elementos?

Do ponto de vista prático, os “softwares” de Elementos Finitos oferecem-nos uma **biblioteca** de elementos do programa, contendo diversos **elementos**, cada qual tentando representar um **diferente comportamento físico** conhecido da Mecânica Estrutural (placas, cascas, membranas, sólidos, vigas, etc). Esse comportamento é descrito por intermédio de “funções matemáticas” que em última análise contabilizam a **rigidez daquele elemento individual**. Mesmo para um simples elemento de viga essa rigidez apresente diversos componentes diferentes: rigidez axial, rigidez à flexão, ao cisalhamento, à torção, etc.

A forma mais compacta e elegante de representar essas características dos elementos no computador é por intermédio da **Álgebra Matricial**. Daí decorre o conceito de **Matriz de Rigidez de um Elemento**. Assim como a rigidez de uma mola é contabilizada por intermédio da relação força–deslocamento para a mola, em um Elemento Finito a idéia é a mesma, porém em caráter mais amplo, de sorte que os diversos componentes de rigidez de um elemento estão relacionados aos diversos componentes de força e deslocamentos presentes. Dispondo da Biblioteca de Elementos, o analista estrutural constrói um modelo adequado da estrutura acessando a essa biblioteca, desde que conheça como cada elemento trabalha. Assim, o software monta a **matriz de rigidez da estrutura** a partir da **matriz de rigidez de cada elemento**, que em última análise contabiliza a rigidez da **estrutura inteira**.

E como são obtidas as respostas que interessam ao projetista da estrutura?

Depois de montado o Modelo Estrutural, é determinada a **Configuração Deformada da Estrutura** no computador, por intermédio dos **deslocamentos dos nós**, qualquer que seja a forma da estrutura e o tipo de carregamento. É determinado então o **Estado de Tensões na Estrutura** e conseqüentemente a avaliação de sua **resistência mecânica**.

As aplicações do Método dos Elementos Finitos limitam-se ao âmbito do Cálculo Estrutural?

Não. Embora o **MEF** tenha sido mais tradicionalmente associado a **aplicações estruturais**, como **Análise Linear de Estruturas, Vibrações Livres e Forçadas, Análise Não Linear Envolvendo Grandes Deformações, Grandes Deflexões, Plasticidade, Instabilidade Estrutural, etc**, as **técnicas de discretização de sistemas contínuos** que têm obtido comprovado sucesso no âmbito da Análise Estrutural são mais gerais e podem ser aplicadas em outras áreas de engenharia e análise, constituindo-se em uma

poderosa ferramenta para resolver uma ampla classe de problemas em Física Matemática, tais como **Transferência de Calor, Escoamento de Fluidos, Ondas Eletromagnéticas, Hidrodinâmica**, etc.

Então, o Método dos Elementos Finitos pode ser utilizado no sentido de aplicar o conceito de Engenharia Preditiva?

Sim, o **Método dos Elementos Finitos** é uma ferramenta extremamente valiosa para ajudar as equipes de engenharia em **uma das tarefas mais importantes no desenvolvimento de um produto**, que é **determinar o seu comportamento estrutural e garantir que não haverá falha tanto em condições normais de operação, como em situações críticas de operação**, por intermédio da determinação do panorama de “tensões” no componente.

A análise de tensões é um passo intermediário e um dos “inputs” para tomar decisões sobre a definição das características estruturais do produto (espessuras, materiais, geometria, condições de trabalho etc). A utilização adequada da tecnologia CAE, permite reduzir o ciclo de desenvolvimento do produto e o número de testes de campo, realizando previsões do seu comportamento, resultando em substancial redução de custos.

Para executar uma análise estrutural que conduza a decisões adequadas, deve-se atender a alguns pré-requisitos:

- **Entendimento claro do problema físico a ser simulado;**
- **Conhecimento do comportamento estrutural desejado (critério de projeto);**
- **Propriedades dos materiais envolvidos;**
- **Características dos elementos finitos envolvidos na análise;**
- **Definição da região objeto de interesse, definindo a extensão do modelo de análise;**
- **Condições de Contorno - Cargas e Vínculos da Estrutura.**

Enfim, a **representação adequada do fenômeno físico** que se quer estudar, passa inicialmente pelo **conhecimento do fenômeno**, o que deveria ser até certo ponto óbvio. Satisfeita esta condição, o **modelo proposto deve representar trecho a trecho da forma mais acurada possível o que ocorre na estrutura real**. Essa representação só poderá ser feita se o “analista estrutural” **conhecer o comportamento dos elementos finitos disponíveis e identificar na estrutura o objeto de análise dos comportamentos**, de sorte a utilizar o elemento adequado para cada aplicação. Em resumo, **os Programas de Elementos Finitos não são sob hipótese alguma ferramentas mágicas, que independem do julgamento do Analista**, constituem um “auxílio” ao analista, na solução numérica da enorme quantidade de equações algébricas que são geradas decorrentes do processo de montagem dos “elementos” para representar a estrutura inteira.

Que aspectos são importantes durante o processo de Implantação da Tecnologia CAE nos departamentos de engenharia das empresas?

Um dos pontos mais importantes que contribui comprovadamente para o sucesso e progresso no uso dos recursos de CAE, e que tivemos oportunidade de verificar nestes últimos 26 anos trabalhando com o Método, está relacionado aos **Conceitos Fundamentais Obrigatórios na Utilização da Tecnologia CAE**. Muitos profissionais que iniciam suas aplicações nesta área encontram dificuldades na utilização da tecnologia CAE. Essas dificuldades advêm do fato de que **o aprendizado de uso do software é feito sem conhecimento satisfatório do Método dos Elementos Finitos, confundindo-se o aprendizado de manuseio de programas com o conhecimento do Método dos Elementos Finitos**. Justifica-se, portanto, a filosofia de abordagem:

• SE O ANALISTA NÃO SABE MODELAR O PROBLEMA SEM TER O COMPUTADOR, ELE NÃO DEVE FAZÊ-LO TENDO O COMPUTADOR!

Em visão oposta à anterior, muitas vezes o aprendizado é de tal profundidade em “técnicas matemáticas”, que após um longo curso puramente acadêmico, surge a pergunta: **Como utilizar esse conhecimento na prática?** Em função desta abordagem surgem o temor e o desestímulo quanto à aplicação desse conhecimento. Deve-se introduzir o **embasamento conceitual fundamental** visando posterior utilização e entendimento do software aplicativo, à luz dos Conceitos. Esta metodologia, tem-se revelado constituir uma visão equilibrada entre o **conhecimento teórico necessário e a aplicação prática**, sendo o ponto de partida para aqueles que pretendem se desenvolver nesta área. Acreditar que um mero treinamento de comandos do software, fornecerá o subsídio para as aplicações seguras do método, constitui outra temeridade, e o custo dessa abordagem normalmente é muitíssimo maior que o custo de um bom treinamento conceitual. Adicionalmente, esta visão equivocada conduz muitas vezes ao descrédito quanto aos resultados do uso desta tecnologia.

Os softwares de elementos finitos contém uma quantidade enorme de recursos e comandos. Normalmente são efetuados treinamentos com exemplos em tutoriais, e após a repetição de um caso, muitas vezes o usuário sabe resolver aquele problema, mas tem dificuldade de tomar iniciativa em novas aplicações. Qual o motivo desta dificuldade, e qual a melhor forma de abordar essa importante questão?

Essa questão está relacionada à “base conceitual” do Método. Muitas implantações são feitas focalizando-se o software como a salvação para todos os problemas, e que já comentamos tratar-se de uma visão equivocada. Durante os processos de implantação, costumo comentar o caso fictício de um paciente que vai a um médico, e este sugere ao paciente que não entende muito daquele assunto, mas tem um software de medicina que é só entrar com os sintomas e a resposta do seu mal e os remédios já são obtidos como “saída” do programa. O paciente, se tiver juízo, levanta e sai correndo do consultório. Não há motivo para supor que na área de engenharia de simulação seja diferente, embora hajam “pacientes” que acreditam nessa falácia, e “médicos” que as vendam. Costumo dizer que se algum vendedor de software oferecer o seu produto com essa visão, levante e vá correndo ao “Procon”.

Portanto, a abordagem do sistema CAE deve contemplar os principais recursos que são efetivamente necessários para a resolução dos problemas de modelagem estrutural no dia-a-dia do Engenheiro de Aplicação. Deve abordar objetivamente a “espinha dorsal” do Sistema CAE, estabelecendo os **procedimentos básicos de referência para a utilização do sistema** em qualquer outra análise a ser efetuada. É importante escolher alguns exemplos controlados, de sorte a confrontar as expectativas de resposta com os resultados obtidos no software, mas sempre justificando cada passo à luz da Teoria. Só dessa forma se ensina o caminho.

Deve-se focalizar a **metodologia operacional do sistema CAE** através da “resolução completa e passo-a-passo” de um exemplo de estrutura onde são utilizados os diversos elementos finitos, identificando a **seqüência básica de etapas na aplicação do Método dos Elementos Finitos**. Não é necessário o conhecimento de todos os recursos visuais do software que são inúmeros; deve-se focalizar a atenção nos recursos conceituais e não na imensa quantidade de “perfumaria” que o software pode oferecer.

Dessa forma, a aplicação prática no software CAE deve ser efetuada cobrindo-se todas as etapas de uma análise com os recursos do MEF:

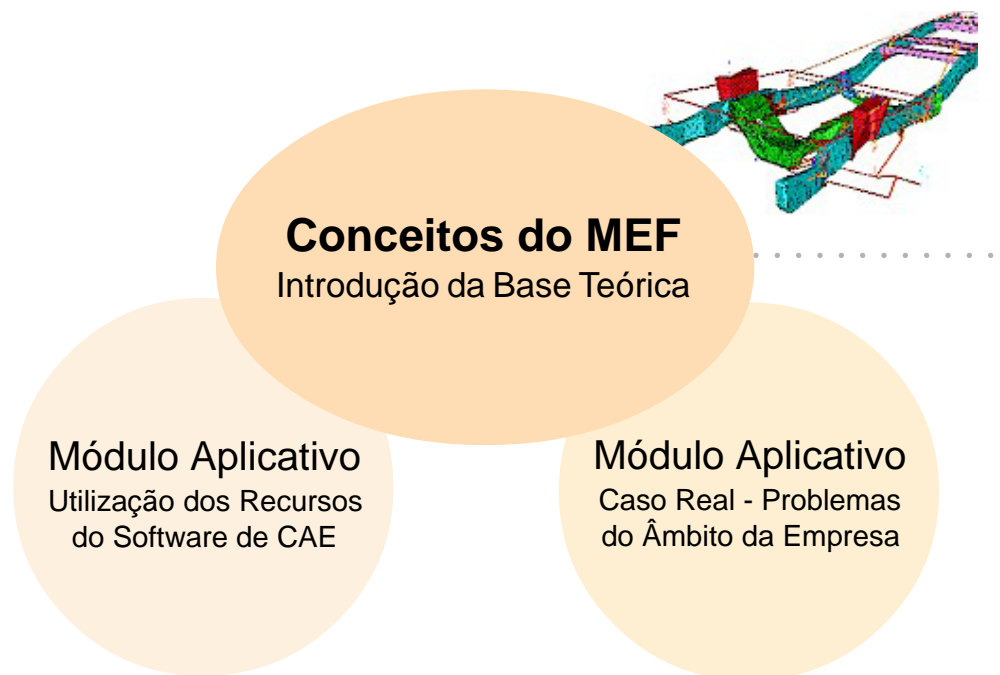
- **Problema Estrutural;**
- **Planejamento do Modelo em Elementos Finitos;**
- **Elaboração da Malha de Elementos Finitos;**
- **Condições de Contorno (Restrições e Carregamentos);**
- **Solução e Verificação dos Resultados.**

Quais as recomendações finais que poderíamos efetuar em termos do uso da Tecnologia CAE, objetivando uma implantação adequada?

Deve-se ter em mente que o uso da tecnologia CAE não se limita a uma simples aplicação de cálculos baseados em um programa de Elementos Finitos. Para fazer sentido, e apresentar utilidade prática, o uso do Método dos Elementos Finitos deve ser feito a partir de um “Procedimento Geral de Análise”,

fundamentado no que se pode chamar de “Critério de Projeto”. Neste, todas as hipóteses formuladas para a concepção do modelo de cálculo - relativa a cargas, condições de contorno, propriedades mecânicas do material, geometria da peça, etc... - devem ser objetivamente estabelecidas, servindo como embasamento das delicadas tarefas de preparação de modelos e interpretação dos resultados.

É dentro destes conceitos que deve-se abordar a “Metodologia de Implantação”, de forma que o grupo envolvido em um programa deste tipo consolide o treinamento efetuado, participando ativamente da modelagem e análise por Elementos Finitos de Produtos do Âmbito da Empresa. Esta etapa é fundamental, pois a tecnologia CAE é parte integrante da “Metodologia de Pesquisa e Desenvolvimento de Produto”, já que a análise acurada de tensões e como consequência, o comportamento estrutural otimizado do componente depende deste procedimento.



O engenheiro Avelino Alves Filho iniciou suas aplicações no Método dos Elementos Finitos em 1974, quando ainda não eram disponíveis os recursos da Computação Gráfica como auxílio à Tecnologia CAE. Nesse período os Modelos em Elementos Finitos eram gerados no papel, para posterior digitação e preparação de dados de entrada em cartões, para processamento em computadores de grande porte. Desde esse período até hoje, com os atuais recursos da computação gráfica, tem trabalhado em aplicações práticas do Método que incluem Estruturas Oceânicas, Navios, Veículos Rodoviários e Ferroviários, Componentes Mecânicos, e diversas aplicações da Mecânica Estrutural. É diretor do NCE-Núcleo de Cálculos Especiais S/C Ltda., empresa de Serviços, Treinamento e Implantação do Método dos Elementos Finitos, efetuando essas atividades para empresas como Volkswageen Caminhões, Mercedes-Benz do Brasil, Ford Brasil, MWM Motores Diesel, ZF do Brasil, Grupo Iochpe-Maxion, etc. É professor doutor do PECE-Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da USP. Devido a sua ligação com a área didática, onde publicou 12 livros na área de ciências físicas, tem dedicado especial atenção aos Trabalhos de Implantação da Tecnologia CAE, procurando transferir essa experiência de forma equilibrada entre os conceitos teóricos do Método e as aplicações práticas.