

AVELINO  
ALVES

MÁRCIO  
WALBER

AGENOR  
MEIRA

# DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS UTILIZANDO SIMULAÇÃO VIRTUAL

PROCEDIMENTOS  
E APLICAÇÕES

  
ALTA BOOKS  
EDITORA  
Rio de Janeiro, 2022

# SUMÁRIO

Prefácio	VI
Sobre os autores	VII
1. Introdução: uma visão geral	1
2. Modelo de desenvolvimento de produtos utilizando simulação virtual	27
3. Abordagens de problemas estruturais: critérios de projeto	85
4. Aplicação do modelo de desenvolvimento	313
5. Implantação da simulação virtual	393
Referências bibliográficas	401
Índice	403

# 1

## INTRODUÇÃO: UMA VISÃO GERAL

A globalização da economia mundial fez com que as empresas assumissem uma *postura mais competitiva* em relação ao *desenvolvimento de novos produtos*.

Embora façamos adiante a apresentação de diversas técnicas e boas práticas adotadas no Processo de Desenvolvimento de Produtos, os recursos do CAE (*Computer Aided Engineering* — Engenharia Assistida por Computador) desempenham o papel de um dos principais atores neste cenário, e por conta disso, lembraremos alguns pontos importantes que estarão presentes em nossas discussões.

A Engenharia Assistida por Computador (CAE) pode contribuir de forma efetiva no processo de desenvolvimento de novos produtos. Inicialmente, é importante estabelecer e entender a seguinte questão:

**ONDE O CAE/ELEMENTOS FINITOS SE LOCALIZA NO  
PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS?**

**CAE É COMPETITIVIDADE —**

**FALANDO UM POUCO SOBRE ELEMENTOS FINITOS**

Para assegurar a participação em um mercado cada vez mais competitivo, que prima pela velocidade das inovações e atendimento às necessidades reais do consumidor final, as empresas tiveram de introduzir em seu processo produtivo o uso de ferramentas adequadas a cada etapa desse processo, agilizando as atividades com vistas a um aumento da qualidade do produto.

Na prática, esses processos produtivos desencadearam o uso de novas tecnologias disponíveis, como forma de garantir a sobrevivência das companhias. O conceito de qualidade passou a ser abordado como “*assegurar o atendimento a todos os itens exigidos*”

*pelo cliente e ao maior número de itens desejáveis, com cumprimento de prazos determinados e menor custo”.*

As empresas foram obrigadas a adotar “*Sistemas de Qualidade*” que passaram a ser exigidos pelos clientes como segurança, obrigando seus fornecedores a praticar a política de “*garantia de qualidade*” em todo o **processo de desenvolvimento de novos produtos** e manutenção dessa qualidade em sua linha de produção.

Alguns desses sistemas, conhecidos como ISO-9000, QS-9000 e outros, apenas para exemplificar, foram introduzidos e se tornaram indispensáveis para o atendimento ao mercado interno e externo.

Alguns termos passaram a fazer parte da rotina de trabalho de quase a totalidade das empresas, tais como Sistemas de Qualidade KAIZEN, FEMEA, CEP, CPK, CMK, QFD, logística e, em particular, itens fundamentais para quem vive a rotina de desenvolver projetos e, em consequência, produtos, a saber:

- **CAD:** Projeto Assistido por Computador
- **CAE:** Engenharia Assistida por Computador
- **CAM:** Manufatura Assistida por Computador

O mercado passou a ser mais exigente em relação à formação do perfil do profissional, exigindo uma mão de obra mais qualificada e continuamente atualizada. Ao mesmo tempo, o avanço dos recursos da informática por intermédio de *hardwares* e *softwares* cada vez mais poderosos, rápidos e acessíveis contribuiu para o aprendizado e a expansão do uso das novas ferramentas e tecnologias nas companhias.

Seguindo esse processo competitivo, a **redução de prazos e custos no desenvolvimento de novos produtos e na alteração de produtos existentes** tornou-se uma realidade e um diferencial para quem faz uso de novas tecnologias introduzidas nas áreas de engenharia de produto, processos e de produção.

As ferramentas de CAD — *Computer Aided Design* e CAE — *Computer Aided Engineering* vieram como um poderoso auxílio para a capacitação técnica das equipes de engenharia, tornando possível as metas de redução de prazos e custos.

Esses recursos são realmente fantásticos, mas neste estágio de nossa tratativa deste texto, uma observação deve ser obrigatoriamente mencionada. Elas por si só não resolvem o problema, é muito importante a presença do usuário treinado nos conceitos que sustentam essas ferramentas. De maneira figurada, poderíamos dizer que temos a presença do *hardware*, do *software* e como centro de todo o processo, o “*peopleware*”, que é o projetista que conhece os conceitos de projeto e o analista que conhece os conceitos de CAE, e que se assentam nesta máxima:

**“Se o engenheiro não sabe modelar o problema sem ter o computador, não deve fazê-lo tendo o computador.”**

Isso posto, ao se analisar as fases do Desenvolvimento de Produtos, antes da disponibilidade da utilização de softwares como CAD e CAE, tínhamos custos elevados e prazos demasiadamente extensos para evoluir do produto inicialmente idealizado até a efetiva construção do produto final. Alguns fatores estão relacionados a essa demanda, a saber:

- *Demora na concepção do produto.*
- *Conflito de informações entre as áreas envolvidas.*
- *Tempo gasto na fabricação de ferramental para protótipos.*
- *Tempo gasto na fabricação dos protótipos.*
- *Tempo gasto na validação do produto.*
- *Reprojeto em função de alterações necessárias, o que muitas vezes reinicia todo o processo a partir da concepção.*
- *Atraso nas informações de Engenharia, desenho de detalhes, dados para processo de fabricação etc.*

Analisando os fatores considerados anteriormente, é fácil compreender que toda morosidade está entre a “concepção do produto” e a “definição final das informações de engenharia”.

Essa faixa, que compreende as atividades de fabricação de ferramental, protótipos e validação, chegava a dispor de 60% a 70% do prazo total no desenvolvimento de novos produtos. A **fabricação de protótipos** gerava surpresas e imprevistos que eram resolvidos por improvisação, ou seja, o produto era modificado por “**tentativas e erros**”. Veremos adiante que um grande passo no uso das tecnologias mencionadas é a construção dos chamados “**protótipos virtuais**”, que permitem, no ambiente computacional, simular o comportamento do futuro produto a ser fabricado, sem gastos iniciais de materiais e ferramental. Esse é um casamento entre os recursos de software, hardware e, como mencionado, o conhecimento dos conceitos por parte dos projetistas e dos engenheiros.

Os custos elevados e a morosidade dos prazos envolvidos nesses processos que envolvem tentativas e erros anulam o poder competitivo das empresas frente a concorrentes que utilizam ferramentas aplicadas ao desenvolvimento de produtos, como o CAD e o CAE.

**O uso da tecnologia CAD/CAE no DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS revela-se como um grande diferencial, reduzindo os prazos e os custos, devolvendo assim o poder competitivo das empresas.**

Os *softwares* CAD/CAE permitem o trabalho em Engenharia Simultânea, criando atividades gerenciadas paralelamente entre as diversas áreas de desenvolvimento, antes realizadas em “série”. Essa simultaneidade reduz significativamente os prazos e,

com a qualidade dos dados compartilhados, evita o conflito de informações entre as áreas envolvidas.

Em conjunto com o que foi anteriormente mencionado, as atividades de concepção do produto, reprojeto e definição das informações de engenharia se beneficiam de ferramentas práticas, rápidas e seguras, garantindo assim prazos menores e maior controle das etapas de desenvolvimento.

Mas, sem dúvida, é nas atividades de fabricação de ferramental, fabricação de protótipos e validação do produto que os recursos de CAD/CAE se mostram indispensáveis na redução de custos e de prazos.

A partir do conhecimento do produto, de suas características construtivas, de sua condição em regime de trabalho e de critérios de validação, é possível a construção de modelos, os chamados protótipos virtuais, que simulam a condição real de uso do produto.

Os longos prazos e custos envolvidos em ferramental, protótipos e validação são vencidos pela criação, simulação e análise em CAD/CAE no processo de desenvolvimento do produto. Antes de se partir para a fabricação de protótipos, que podem ou não ter resultados satisfatórios, o Modelo/Protótipo Virtual direciona as decisões a serem tomadas de forma a definir, dentro de uma ou mais propostas, qual a melhor configuração final do produto a ser desenvolvido, que atenda a todos os requisitos de qualidade e aos critérios de projeto, assegurando a competitividade da empresa.

Vale sempre ressaltar que, de todos os ganhos reais que o uso do CAD/CAE proporciona, é de vital importância a necessidade de formação da mão de obra especializada que tirará todos os recursos dessa tecnologia. A equipe envolvida nessas ações deve conhecer profundamente as características técnicas e os processos de produção e de simulação do produto que se deseja desenvolver. Essas ideias, que hoje são incorporadas ao trabalho de profissionais autônomos, profissionais de empresas de médio e grande porte, para diversas aplicações no desenvolvimento de produtos que demandam avaliação estrutural, permitem o aprimoramento de seus serviços e produtos.

A Figura 1.1 mostra uma linha do tempo com as vantagens proporcionadas pela tecnologia CAE, iniciando com a situação de globalização da economia mundial e passando pela velocidade das inovações e qualidade do produto. Já a Figura 1.2 mostra exemplos de projetos desenvolvidos por meio da aplicação da tecnologia CAE.

FIGURA 1.1 – Vantagens da aplicação CAE/CAD.

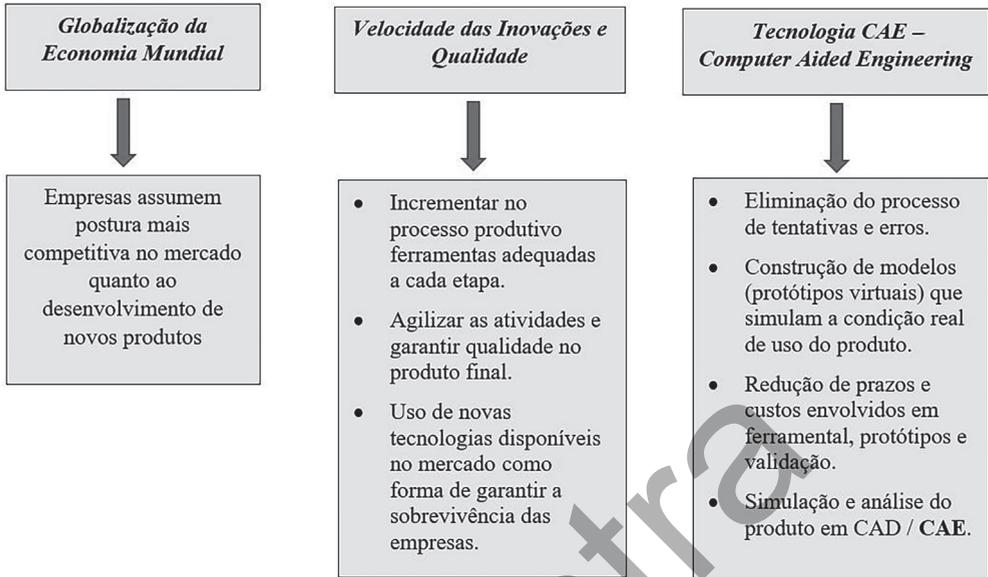
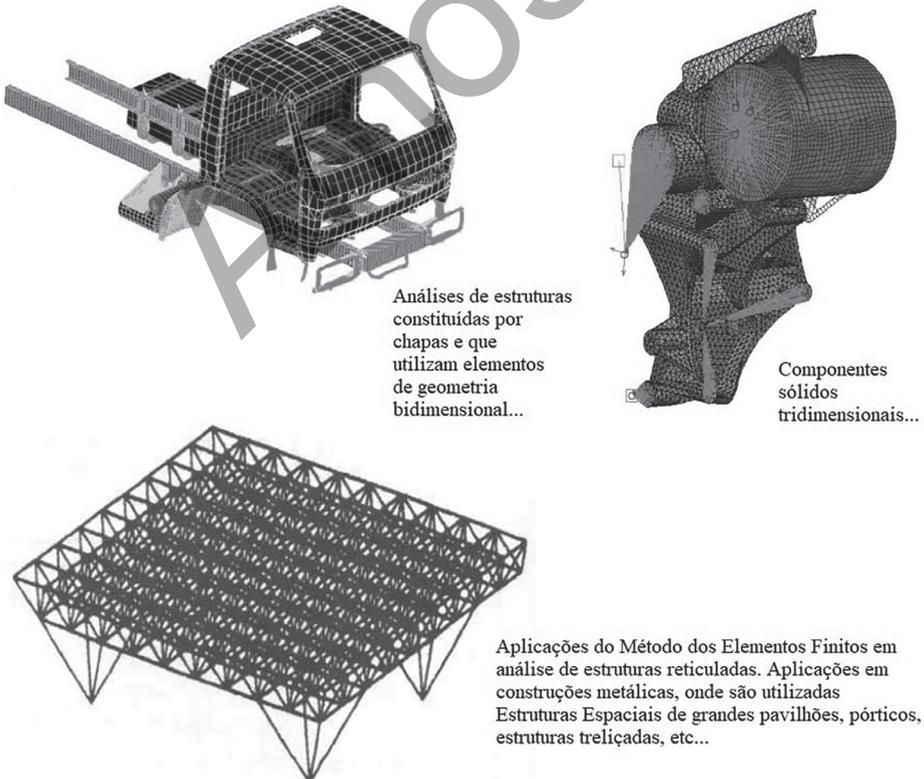


FIGURA 1.2 – Modelos CAE de diferentes aplicações.

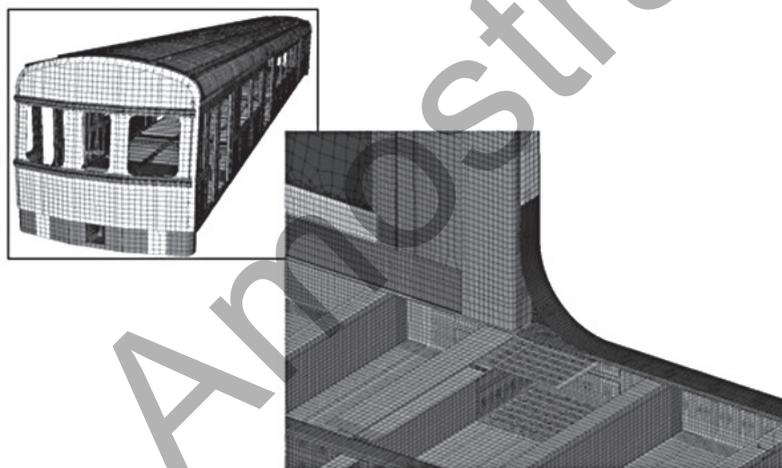


É importante ter em mente que a utilização dos recursos de elementos finitos envolve conceitos, e não é possível queimar etapas e encarar o *software* de análise como uma ferramenta que toma decisões, pois estas são tomadas pelo usuário, com base em conceitos. São decisões de Engenharia!

Há uma sequência de atividades que demandam domínio dos conceitos, e esse binômio — conceitos e ferramenta computacional — bem equilibrado torna o uso do CAE um poderoso aliado no desenvolvimento de novos produtos.

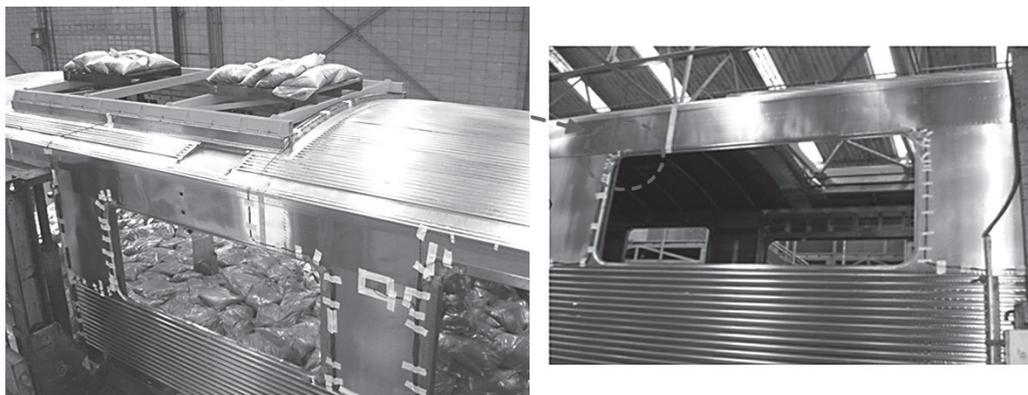
As figuras 1.3 a 1.6 mostram, a título ilustrativo, alguns modelos em elementos finitos que permitem a certificação do produto por meio de testes práticos, apenas para constatar a validade dos cálculos por intermédio do uso do CAE. A Figura 1.3 mostra o modelo numérico de um carro de passageiros (trem de passageiros) simulado pelo método dos elementos finitos, cujos conceitos básicos necessários para realização da simulação serão explicados mais adiante.

FIGURA 1.3 – Modelo em elementos finitos de um carro de passageiros.



A Figura 1.4 mostra um teste prático com extensômetros (*strain gages*) em um carro de passageiros (trem) para certificar o modelo de cálculo por elementos finitos.

○ — FIGURA 1.4 – Medição com extensômetros para validação da análise numérica.



Na região indicada pela seta do carro de passageiros, que é normalmente uma região crítica (cantos de portas e janelas), a diferença entre a medição e o cálculo por elementos finitos foi de aproximadamente 1%, demonstrando a precisão do cálculo numérico.

As figuras 1.5 e 1.6 mostram detalhes da preparação virtual do modelo de um flange, com aplicação na indústria do petróleo, evidenciando a preparação da malha de elementos finitos, que deve ser elaborada com muito cuidado, observando o tipo de elemento empregado e o seu tamanho, para que a simulação produza os resultados com precisão.

○ — FIGURA 1.5 – Modelo numérico de um flange.

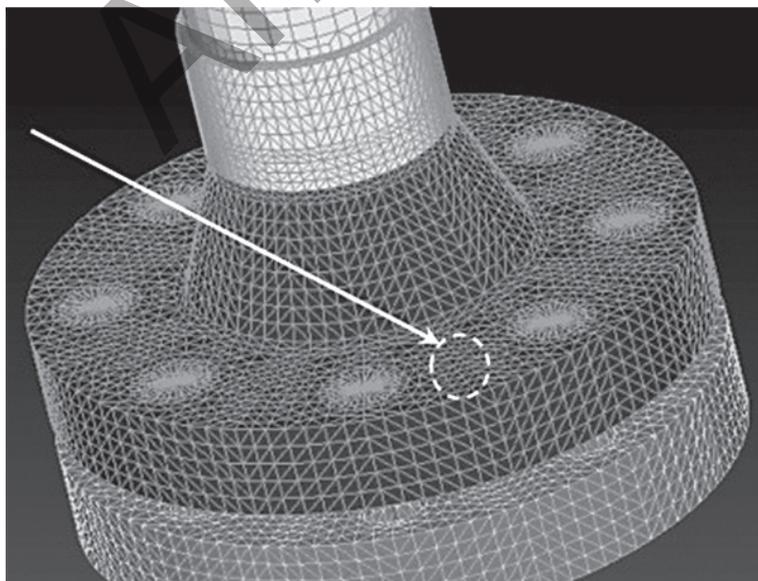
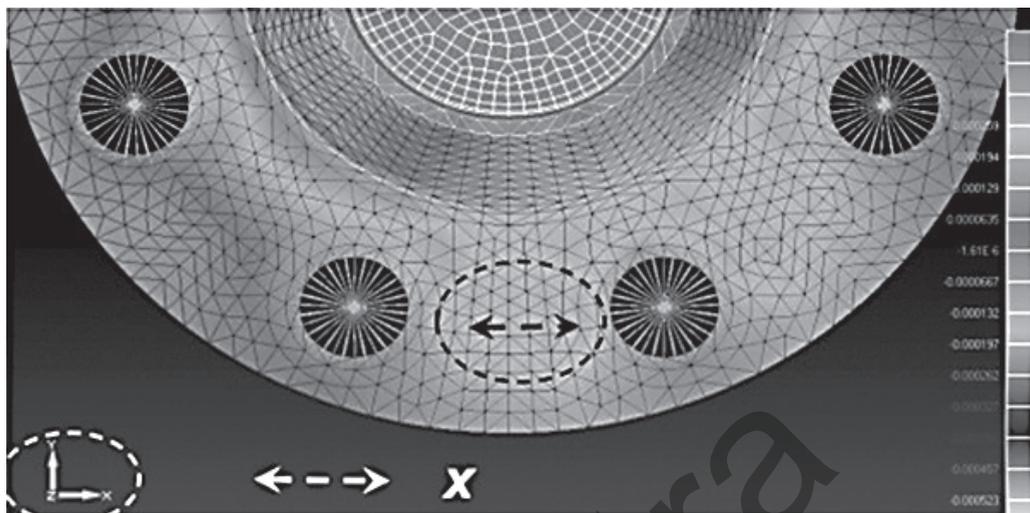


FIGURA 1.6 – Vista superior da malha de elementos finitos do flange.



Os resultados de deformação obtidos pelo modelo de elementos finitos apresentaram um  $\varepsilon = 221,16 \mu\text{s}$ , e as deformações medidas com extensômetros apresentaram um  $\varepsilon = 225,4 \mu\text{s}$ . A diferença entre o cálculo por elementos finitos e a medição foi de 1,9%.

O quadro de revisão apresentado a seguir mostra uma reflexão fundamental em relação à tecnologia CAE, sendo importante para a formação daqueles que iniciam seus estudos no método dos elementos finitos e para aqueles que já são usuários.

### QUADRO DE REVISÃO 1.1: REVENDO O PASSADO E FAZENDO UMA REFLEXÃO

Quando passávamos pelas primeiras aplicações do método dos elementos finitos, ainda não estavam disponíveis os recursos da computação gráfica como auxílio à chamada Tecnologia CAE (*Computer Aided Engineering*). 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 a “evolução” dos atuais recursos da computação gráfica que utilizamos intensamente, tivemos a felicidade de trabalhar em aplicações práticas do método que incluem estruturas oceânicas, navios, veículos rodoviários e ferroviários, componentes mecânicos e diversas aplicações da mecânica estrutural. Entretanto, é notável que, *apesar das facilidades gráficas introduzidas, a essência do método continua a mesma*.

Na década de 1970, não existiam recursos visuais que pudessem vender a imagem da Tecnologia CAE como uma ferramenta mágica, e o engenheiro utilizava o método dos elementos finitos ciente de que a sua utilização era apoiada em uma base conceitual. Devido a apelos de marketing, as facilidades gráficas disponíveis levaram, muitas vezes, à apologia de que a aprendizagem dos comandos do programa seria suficiente para a solução da maior parte dos problemas de engenharia, criando uma cultura mais voltada para a forma do que para a essência da solução dos problemas. Muitas decepções no uso dessa ferramenta de análise decorreram desse enfoque equivocado. As formas, os processos de “conversar” com os programas se modificam, mas a essência e os conceitos permanecem.

É interessante comentar o caso fictício de um paciente que vai a um consultório e o médico sugere que não entende muito daquele assunto, mas tem um *software* de medicina, e informando os sintomas, a resposta do seu mal e os remédios já são obtidos como “saída” do programa. O paciente, se tiver juízo, sai correndo do consultório. Não há motivo para supor que na área de engenharia de simulação seja diferente, embora haja “pacientes” que acreditem nessa falácia, e “médicos” que a vendam.

Um dos pontos mais importantes que contribuí comprovadamente para o sucesso e progresso no uso dos recursos de CAE, e que tivemos a oportunidade de verificar nesses anos trabalhando nessa área, está relacionado aos *CONCEITOS FUNDAMENTAIS OBRIGATÓRIOS NA UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA CAE*. Muitos profissionais que iniciam suas aplicações na área de elementos finitos encontram dificuldades, pois o aprendizado de uso dos *softwares* é feito sem base conceitual, confundindo o aprendizado de manuseio de programas com o conhecimento do método dos elementos finitos. Justifica-se, portanto, a filosofia de abordagem:

***“Se o engenheiro não sabe modelar o problema sem ter o computador, ele não deve fazê-lo tendo o computador.”***

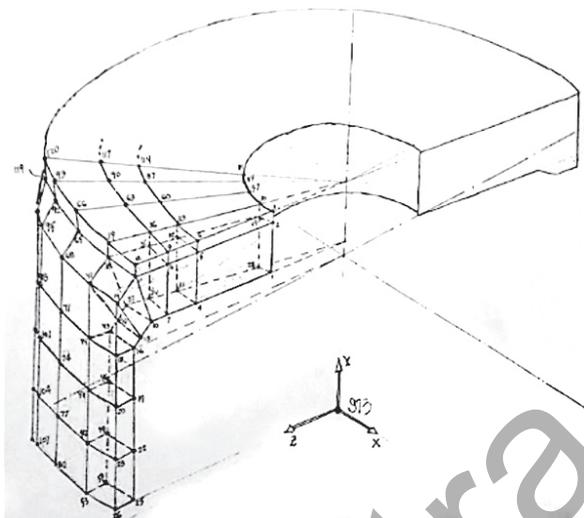
Por outro lado, muitas vezes, o aprendizado é de tal profundidade em “técnicas matemáticas”, que após um longo curso voltado para o entendimento das formulações gerais do método, visando um grande espectro de aplicações, surge a pergunta: ***Como utilizar esse conhecimento na prática?*** Em função dessa abordagem surgem o temor e o desestímulo quanto à aplicação desse conhecimento, tornando o estudo e entendimento do método uma dádiva para iniciados.

Em uma área em que há mestres de saber inigualável e literaturas disponíveis já consagradas, é importante que se apresente os conceitos do método dos elementos finitos de forma mais didática, em que, a partir de exemplos simples, e em grau crescente de dificuldade, introduza-se o ***embasamento conceitual fundamental***, visando a posterior utilização e entendimento dos *softwares* aplicativos, à luz dos conceitos. Deve-se sempre, dentro dessa linha, sem fugir aos aspectos matemáticos que convêm a uma abordagem conceitual, valorizar o ***entendimento físico do método e dos conceitos; estes permanecem e são o alicerce para uma boa utilização dos softwares aplicativos***. As formas, os processos dos quais o usuário dispõe para definir os modelos no computador, surgem e morrem; podem ser mais rápidos a cada dia, em função das tecnologias gráficas cada vez mais poderosas. No entanto, é importante observar sempre que dispor de uma ferramenta gráfica poderosa, mas sem base conceitual, pode ser o caminho mais rápido para obter uma resposta errada.

Essa visão é importante para a formação daqueles que iniciam seus estudos no método dos elementos finitos e para aqueles que, já sendo usuários do método, tenham o interesse de meditar um pouco sobre os seus conceitos fundamentais, os quais constituem o alicerce para a resolução das dúvidas que se colocam diante de nós ao abordarmos as grandes questões práticas da engenharia. O uso da ferramenta computacional com essa visão física e de engenharia é fundamental para o uso do CAE no desenvolvimento de produtos.

A Figura 1.7 mostra o exemplo do modelo de um suporte de equipamento de trem de metrô. A tecnologia CAE já estava disponível, muito antes do CAD, mas os recursos gráficos não, e os modelos eram construídos, necessária e obrigatoriamente, alicerçados nos conceitos do método. Em resumo, a malha de elementos finitos era feita “à mão”!

○ — FIGURA 1.7 — Modelo de elementos finitos produzido sem auxílio computacional.



## CONSEQUÊNCIAS DA DISCUSSÃO ANTERIOR

Como podemos perceber, o CAE passou a fazer parte do Conceito de Qualidade no Desenvolvimento dos Produtos. Uma das tarefas mais importantes nesse aspecto, desde o simples caso de um componente mecânico, ou até a estrutura completa de um veículo, ou qualquer estrutura, é determinar seu comportamento estrutural e garantir que não haverá falhas tanto em condições normais de operação como em situações críticas. O método dos elementos finitos é ferramenta extremamente valiosa para determinar esse comportamento.

É crescente o número de empresas desenvolvendo os seus produtos com a utilização de modernas ferramentas de análise, tal como o CAE. Tais recursos tornaram-se essenciais à obtenção de produtos com alta qualidade e desempenho. Ao invés de se desenvolver o produto por tentativas e erros, com aumento dos custos de produção, procura-se obter significativos ganhos com o uso da Engenharia Preditiva. O seja, o comportamento dos componentes e sistemas é simulado no computador, onde são previstas as falhas e as conseqüentes correções dos problemas por intermédio das técnicas de simulação, mas cabe uma reflexão.

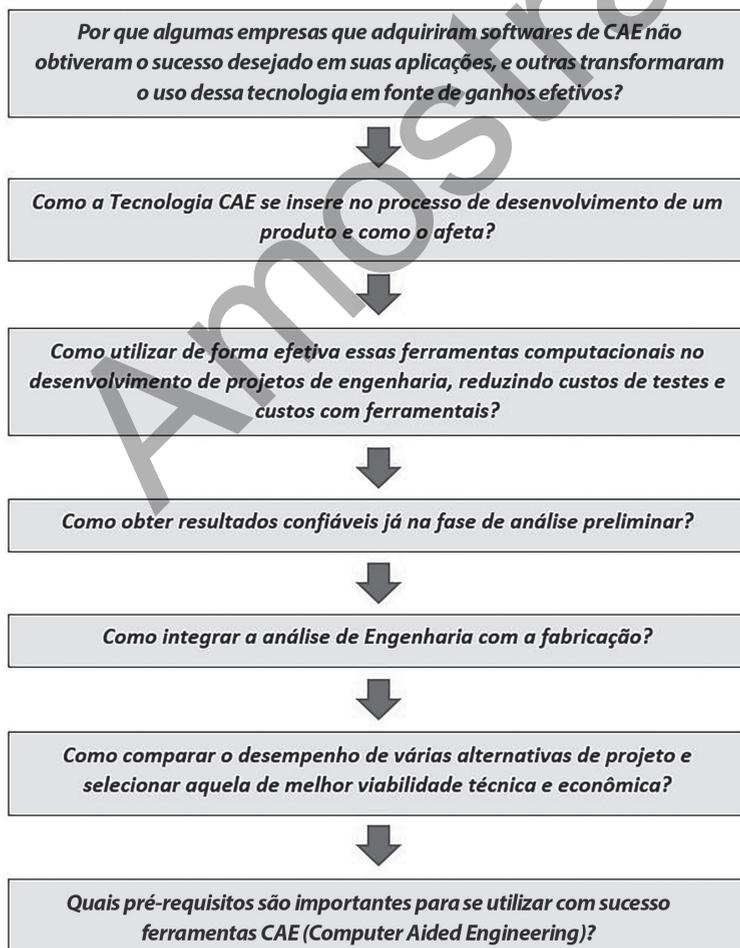
Apesar das vantagens citadas em relação ao uso da tecnologia CAE, a experiência tem mostrado que a introdução de sistemas CAE para execução automática das tarefas de Engenharia, por si só, por vezes não conduziu a resultados esperados para algumas empresas, gerando, em alguns casos, frustrações e até descrédito.

Observou-se na prática que, mesmo com a disponibilidade de poderosas ferramentas para análise, o tempo gasto com testes de durabilidade em campos de prova ou la-

boratórios nem sempre foi reduzido substancialmente. Os objetivos só são atingidos se alguns cuidados e procedimentos foram aplicados durante o processo de implantação e uso dessa tecnologia.

A expectativa, muitas vezes frustrada, trazida pelos sistemas informatizados deve-se basicamente ao fato de que a tecnologia computacional por si só não garante o retorno esperado no desenvolvimento de projetos e, em consequência, dos produtos. Surgem então alguns pontos vitais no Processo de Implantação e uso do CAE nas empresas. Essas questões serão complementadas adiante, mas estão e devem estar sempre presentes ao se tratar do uso da tecnologia CAE. O diagrama seguinte chama nossa atenção para essas questões, que em uma primeira instância devem fazer parte de nossos questionamentos antes de iniciarmos qualquer ação nessa área. A Figura 1.8 mostra uma sequência de perguntas referentes a dúvidas relacionadas à aplicação do método dos elementos finitos.

FIGURA 1.8 – Perguntas e respostas sobre aplicação do método dos elementos finitos.



## A PRIMEIRA VISÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS – ALGUMAS QUESTÕES IMPORTANTES – USO DO CAE E SUA IMPLANTAÇÃO

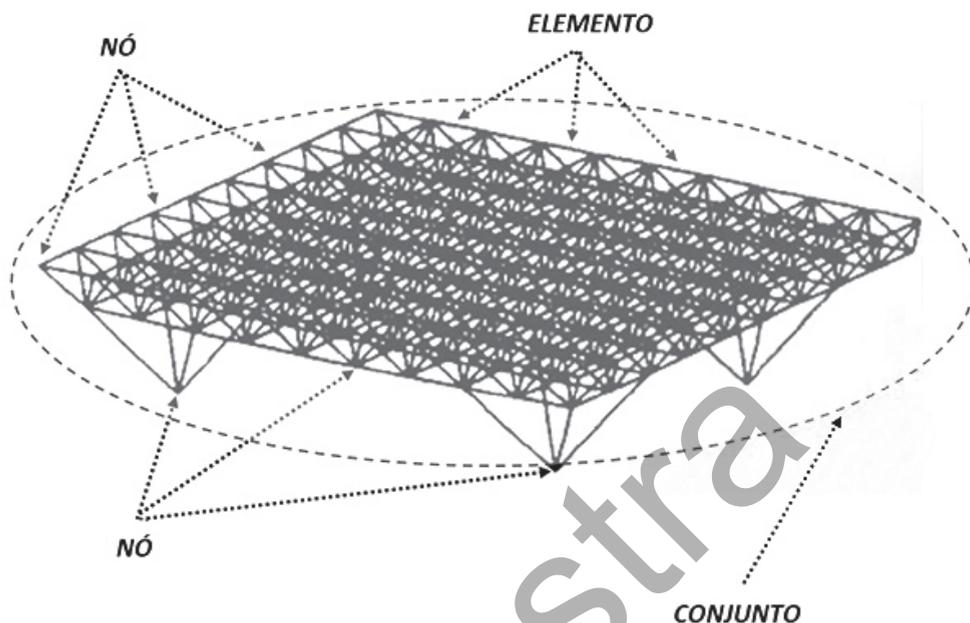
Dentro do contexto de uso do CAE no Desenvolvimento dos Produtos, colocaremos algumas questões que possam fornecer um direcionamento sobre a forma adequada de tratar a implantação e o uso dessa tecnologia. Evidentemente, a formulação matemática do Método não é objeto deste texto, e na bibliografia recomendada indicamos as leituras adequadas aos usuários que pretendem tirar resultados das conhecidas análise lineares, dinâmicas e não lineares. Vale sempre lembrar que o foco desta obra é o desenvolvimento de produtos, e como o CAE é um dos atores principais nessa missão, estamos condensando esses conceitos aqui para não dispersarmos nossos estudos, evitando-se a consulta em uma vasta literatura.

DE FORMA SIMPLES E DIRETA, QUAL É A IDEIA PRINCIPAL DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS, UMA DAS MAIS PODEROSAS FERRAMENTAS DE ANÁLISE, UTILIZADA DE FORMA CRESCENTE COMO RECURSO DE APOIO À ENGENHARIA (COMPUTER AIDED ENGINEERING)?

A Figura 1.9 mostra um tipo de estrutura que estamos acostumados a ver no nosso dia a dia na Engenharia Estrutural. Uma estrutura metálica, constituída de barras individuais e que, conectadas entre si, formam um conjunto. Cada uma dessas barras do conjunto constitui um *elemento*, e esses elementos estão conectados em pontos-chave para formar um conjunto estrutural. A esses pontos-chave os engenheiros dão o nome de Junta estrutural, NÓ estrutural, ou simplesmente NÓ.

O grande objetivo do engenheiro de estruturas é entender o comportamento desse conjunto estrutural. Mas para entender isso, ele precisa entender o comportamento estrutural de cada um de seus elementos. Para um engenheiro de estruturas, entender o comportamento delas é saber como se deformam. Ou seja, entender a deformação da estrutura a partir da deformação de cada um de seus elementos.

FIGURA 1.9 – Estrutura representativa do modelo de elementos finitos.



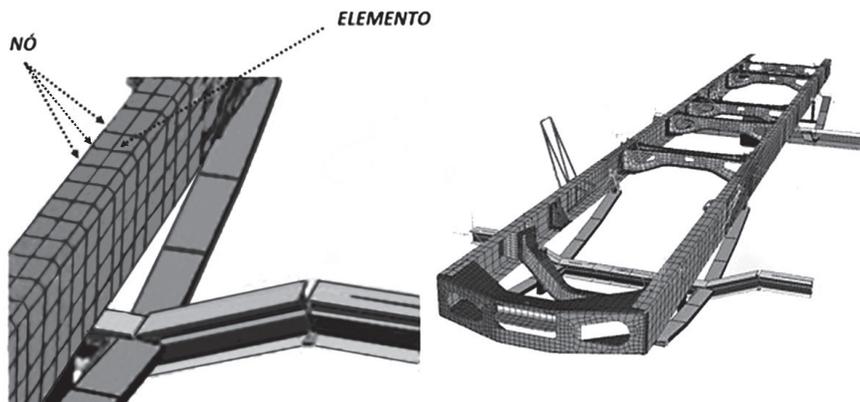
Poderíamos até dizer que faz parte da mente humana, ao tentar entender o comportamento de um conjunto, entender como cada um de seus trechos ou componentes se comporta; entender o comportamento do todo a partir do entendimento do comportamento de cada uma de suas partes. A velha ideia do “*dividir para dominar*”!

Os modelos de elementos finitos fazem exatamente isso: identificam os componentes individuais ou os elementos que fazem parte de um conjunto para entender o comportamento do todo. Portanto, ao se falar em elementos finitos, dois conceitos imediatamente surgem: *os elementos e os nós*.

No caso da estrutura anteriormente mostrada, o entendimento dessa subdivisão é quase que natural. Diríamos que a identificação dos componentes individuais ou elementos e dos nós é imediata.

Já no exemplo a seguir, mostrado na Figura 1.10, essa ideia continua, mas é mais sutil. A subdivisão é artificial, embora a ideia continue sendo entender o comportamento do conjunto a partir de cada um de seus elementos. Certamente você nunca deve ter visto um “chassi de caminhão todo quadriculado se movimentado nas ruas, ou uma malha nas avenidas”.

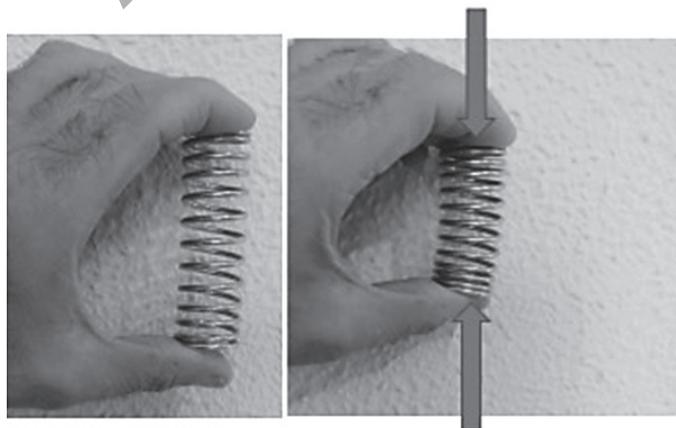
○ — FIGURA 1.10 – Modelo de elementos finitos de um chassi de caminhão.



E QUAL O CAMINHO PARA ENTENDER O COMPORTAMENTO DO  
CONJUNTO ESTRUTURAL?

O entendimento do comportamento do conjunto estrutural está fundamentado em uma ideia bastante simples e que trazemos desde a física básica, que é o conceito de *rigidez*. Ao estudarmos a mola, *definimos a rigidez dela por intermédio de sua constante elástica*. Ao afirmarmos que uma mola tem uma constante elástica de 100Kgf/mm, significa que, se aplicarmos nela uma força de 100Kgf, ela “*deformará*” 1mm. Falando de forma mais simples, já que deformação na mecânica estrutural não tem unidade: o conhecimento da rigidez é o “passaporte” para o cálculo da deformação. E essa é a grande questão do engenheiro de estruturas: calcular a deformação da estrutura e verificar se esta é aceitável para o material que está sendo objeto de estudo. A Figura 1.11 ilustra esse conceito.

○ — FIGURA 1.11 – Exemplo de deformação da mola.



O conceito de “mola equivalente” — ou rigidez equivalente — a um dado conjunto de molas também faz parte do dia a dia do engenheiro ou técnico. Dado um conjunto de molas em série ou em paralelo, podemos saber qual a deformação desse conjunto a partir da deformação de cada um de seus componentes ou elementos. Assim ocorre também na análise estrutural; a rigidez da estrutura inteira depende da rigidez de cada um de seus elementos.

A diferença é que, em uma mola, somente a rigidez axial está presente, e em uma viga, que faz parte do conjunto, ela tem rigidez axial na direção da barra, rigidez à flexão em planos perpendiculares e rigidez à torção. A rigidez da estrutura é contabilizada a partir desses componentes. Ou seja, a “rigidez da estrutura inteira” depende da rigidez de cada um de seus elementos de forma análoga ao conceito da mola equivalente, mas nesse caso as rigidezes se manifestam em várias direções do espaço.

***Pode-se montar a rigidez da estrutura a partir da rigidez de cada um de seus elementos!***

***Essa é, de forma simples, a primeira ideia 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 conectadas entre si por intermédio de pontos discretos que são chamados de *Nós*.

*E por que discretos?* Essa ideia é fundamental no método dos elementos finitos. Quando montamos um modelo, por exemplo, de 10 mil nós, não estão sendo calculados os deslocamentos dos infinitos pontos do contínuo, mas somente daqueles 10 mil. Julgamos que esses 10 mil são suficientes para representar o quanto a estrutura foi deformada. Esse é um ponto que pode ser demonstrado matematicamente e é estudado nos textos e cursos de elementos finitos.

Outro ponto: como normalmente temos milhares ou milhões de equações a serem resolvidas no computador, há uma questão “administrativa” para executar essa árdua tarefa, que é deixada para o computador. O analista monta o modelo que depende do conhecimento dos conceitos do método! E o computador faz a “contas”!

A maneira de administrar essa imensa quantidade de dados requer organização. A forma mais compacta e elegante de armazenar e operar essas informações numéricas no computador é por intermédio de *matrizes*. Inclui-se quanto ao armazenamento dos dados referentes à rigidez dos elementos e da estrutura como um todo.

Daí o porquê de existir a Matriz de Rigidez dos Elementos e a Matriz de Rigidez da Estrutura. *A Matriz de Rigidez da Estrutura é montada a partir da Matriz de Rigidez de cada um de seus elementos.*

Essas operações cujos conceitos gerais foram aqui expostos são detalhadas no curso de elementos finitos referenciadas na bibliografia sugerida nesta obra. A Figura 1.12 mostra os principais passos envolvidos em uma análise de um sistema discreto padrão.

FIGURA 1.12 – Etapas para realização de uma análise estrutural.



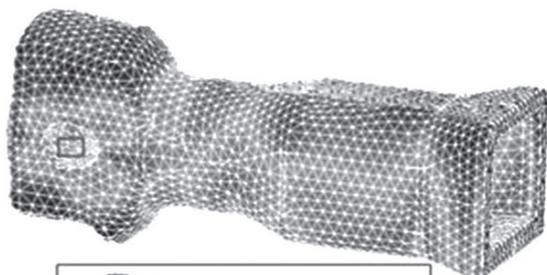
As inúmeras equações algébricas geradas a partir da condição de equilíbrio de cada elemento são resolvidas com o auxílio de computadores eletrônicos. O meio mais eficiente de armazenar e processar essas informações é por intermédio de matrizes, que são bastante utilizadas nos procedimentos do MEF (Método dos Elementos Finitos).

ESSA IDEIA SE APLICA DE MODO GERAL PARA OS MAIS DIVERSOS TIPOS DE ESTRUTURAS DE GEOMETRIA MUITO MAIS COMPLEXAS QUE A DAS “SIMPLES” ESTRUTURAS METÁLICAS RETICULADAS?

Sim. Existem no dia a dia das aplicações mecânicas diversos componentes que apresentam características bastante diferentes das estruturas constituídas apenas por vigas. A caixa estrutural completa de um veículo, por exemplo, compreendendo chassi, para-choques, eixos, componentes de máquinas, carcaças de embreagem e transmissão, caixas de direção etc. Nesses 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.

As figuras de 1.13 a 1.15 mostram modelos de elementos finitos de alguns componentes mecânicos mais complexos utilizados em trens.

FIGURA 1.13 – Modelo de um engate de trem.



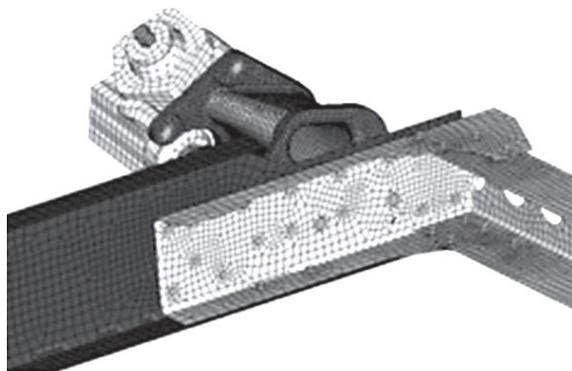
Geometria sólida 3D na qual é montada a malha de elementos



FIGURA 1.14 – Modelo de uma lateral de truque de trem.



FIGURA 1.15 – Modelo de uma caixa de direção.



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 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 e o conhecimento das propriedades do elemento escolhido para representação do problema são 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.

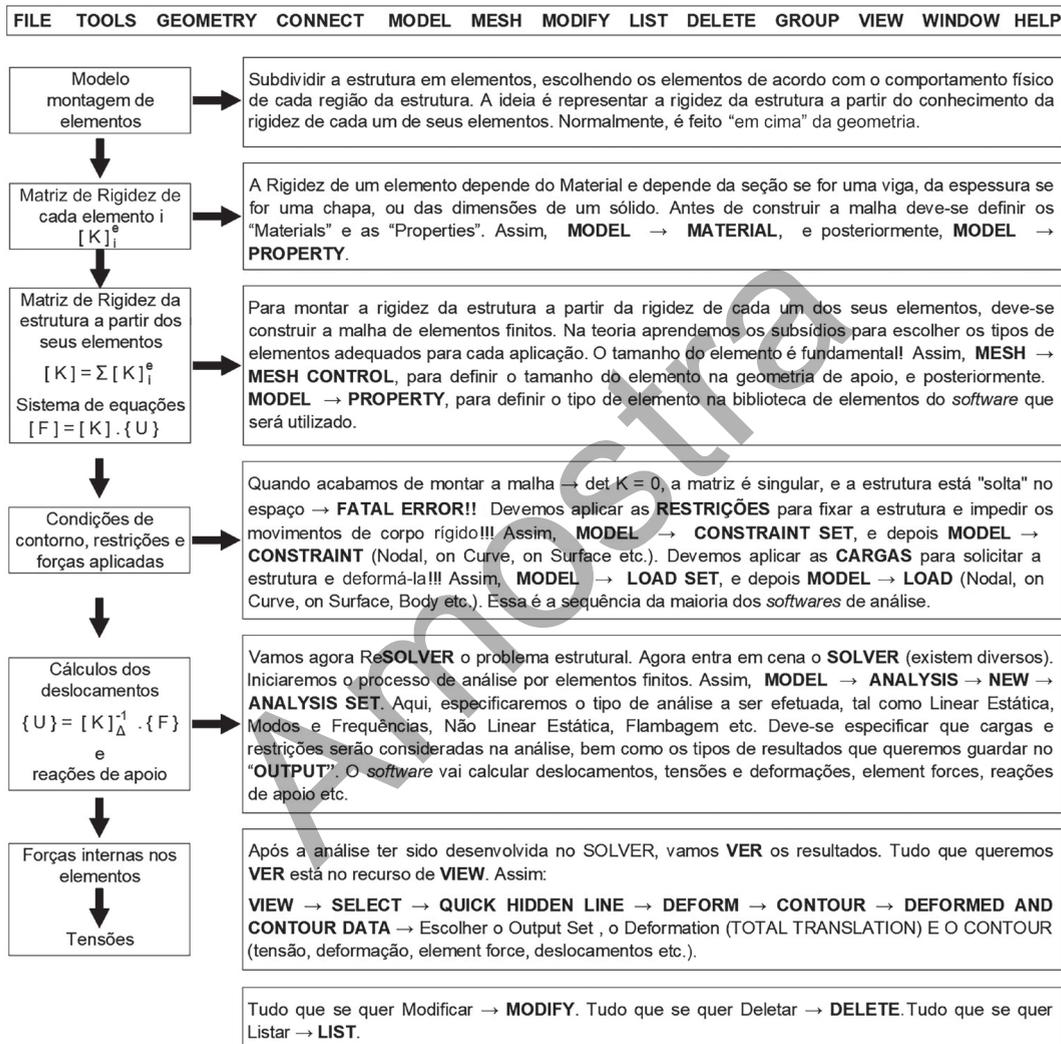
EM TERMOS PRÁTICOS, COMO O ANALISTA ESTRUTURAL “CONVERSA” COM O  
PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS PARA MONTAR UM MODELO, COMO PROCEDE NA  
ESCOLHA DOS TAIS ELEMENTOS?

Do ponto de vista prático, os “*softwares*” de elementos finitos oferecem 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 apresenta 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, em um elemento finito, a ideia 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 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.

A Figura 1.16 representa uma visão geral, sempre ligada aos conceitos, de como a maioria dos *softwares* trabalha, mostrando a sequência lógica do método.

FIGURA 1.16 – Sequência lógica de um tipo de *software* de análise como exemplo ilustrativo respeitando a sequência teórica (Alves Filho, 2015).

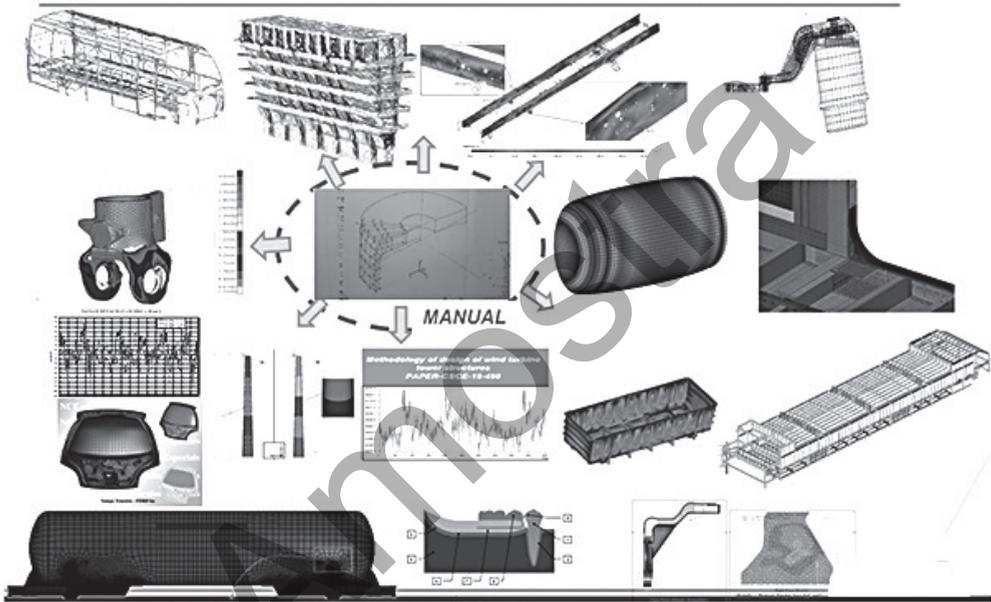


Desde a malha manual do passado até os poderosos recursos gráficos hoje disponíveis, a essência do método não mudou. *Divide-se o conjunto em Elementos*, e para isso obrigatoriamente devemos *entender o comportamento físico de cada trecho da estrutura*. A partir da rigidez de cada elemento, o *software* de Análise monta a rigidez da estrutura e usa a notação matricial. Do ponto de vista matemático, é gerado um sistema de equações algébricas, que para ter solução única, ou seja, ser possível e determinado, tem de ter restrições (apoios!!!). Aplicando-se as cargas, a estrutura se deforma, E essa primeira

ideia é dada pelo deslocamento dos Nós. Entre os nós estão os elementos, e a partir dos deslocamentos nodais conhecidos, usando técnicas de interpolação, são determinadas as deformações dentro de cada elemento, um por um. Se no modelo há um milhão de elementos, o que ocorre no interior de cada elemento é calculado separadamente. A partir da visão da deformação de cada trecho ou elemento tem-se a ideia clara da deformação do conjunto.

A Figura 1.17 ilustra alguns casos de aplicação, resolvidos a partir dos *softwares* e recursos computacionais existentes na atualidade.

○ — FIGURA 1.17 – Casos de análise utilizando recursos computacionais.

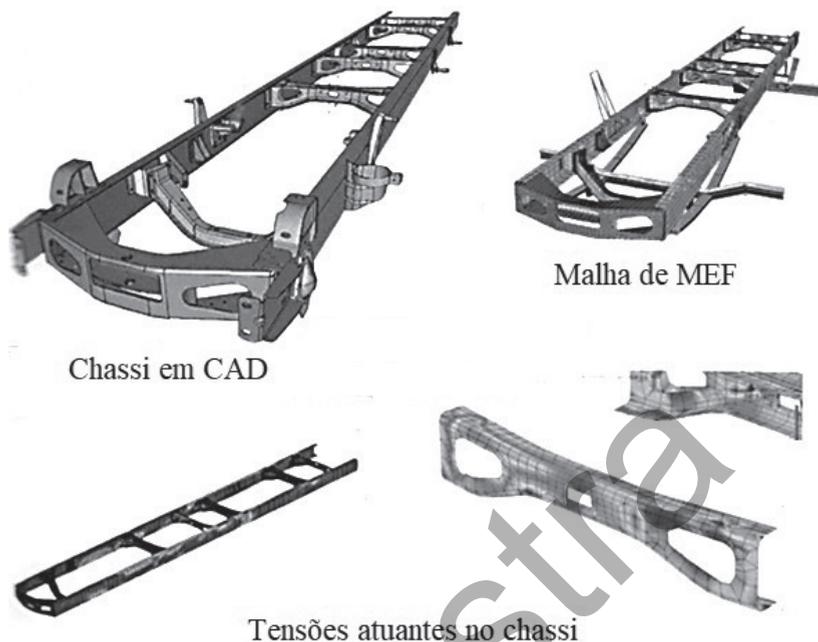


É COMO SÃO OBTIDAS AS RESPOSTAS QUE  
INTERESSAM AO PROJETISTA DA ESTRUTURA?

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.

A Figura 1.18 mostra as etapas de realização de uma simulação estrutural, partindo do modelo em CAD, desenvolvimento da malha e a etapa de pós-processamento, em que se visualizam os deslocamentos e as tensões atuantes na estrutura.

FIGURA 1.18 – Casos de análise utilizando recursos computacionais.

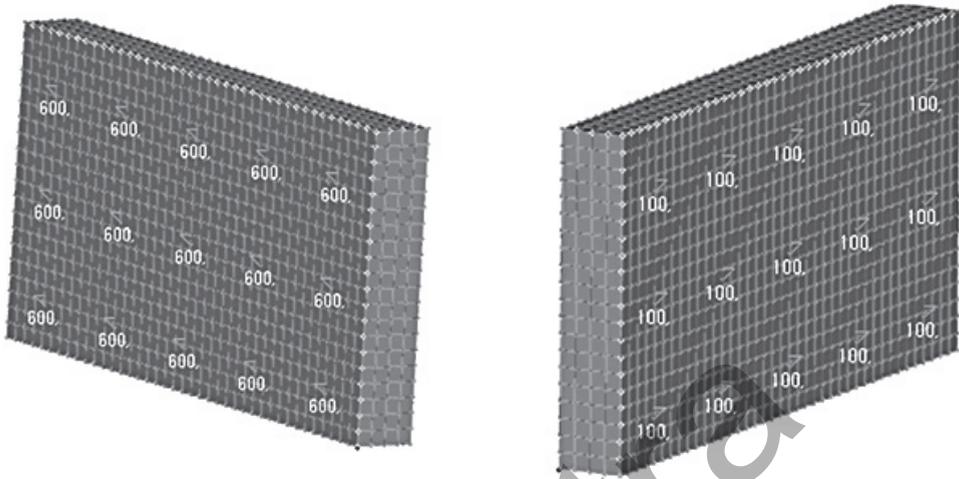


#### AS APLICAÇÕES DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS LIMITAM-SE AO ÂMBITO DO CÁLCULO ESTRUTURAL?

**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 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.

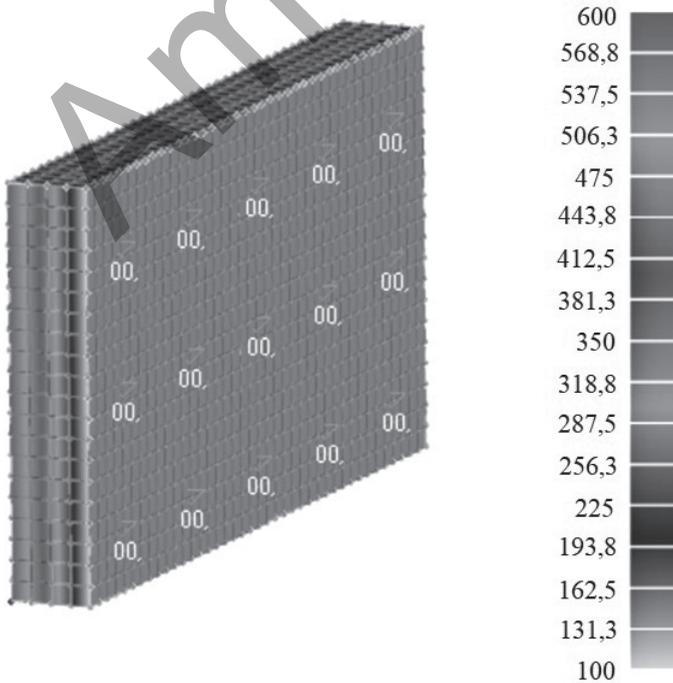
A Figura 1.19 mostra o exemplo de bloco, no qual as duas paredes estão a diferentes temperaturas, pois separam dois ambientes, e o coeficiente de condutibilidade térmica do material é conhecido. Por intermédio do método dos elementos finitos, é possível determinar o campo de temperatura nos blocos.

○ — FIGURA 1.19 – Exemplo da malha de MEF de um bloco.



Como resultado da análise estrutural, o campo de deslocamentos é determinado. Na análise térmica, o campo de temperaturas é determinado (Figura 1.20).

○ — FIGURA 1.20 – Resultado da análise de um bloco.



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 e 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 essa 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 *softwares* de elementos finitos não são sob hipótese nenhuma “ferramentas mágicas”, que independem do julgamento do analista, mas constituem, sim, um “auxílio” na solução numérica da enorme quantidade de equações algébricas que são geradas decorrentes do processo de montagem dos “elementos” para representar a estrutura inteira.

Antes de testar o veículo no campo de provas, a engenharia preditiva, por intermédio do método dos elementos finitos, prevê o bom comportamento do projeto, e os testes são apenas para certificar o produto, e não para efetuar tentativas e erros.

QUE ASPECTOS SÃO IMPORTANTES DURANTE O PROCESSO DE IMPLANTAÇÃO DA  
TECNOLOGIA CAE NOS DEPARTAMENTOS DE ENGENHARIA DAS EMPRESAS?

Um dos pontos mais importantes que contribuem comprovadamente para o sucesso e progresso no uso dos recursos de CAE, e que tivemos oportunidade de verificar nestes últimos 46 anos trabalhando com o Método, está relacionado aos *conceitos fundamentais obrigatórios na utilização da tecnologia CAE*. Muitos profissionais que iniciam suas aplicações nessa área encontram dificuldades na utilização da tecnologia CAE. Estas 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 correto conhecimento do método. Justifica-se, portanto, a filosofia de abordagem já mencionada algumas vezes aqui:

**“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 dessa 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. Essa 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 nessa área. Acreditar que um “mero treinamento” de utilização dos 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 de um bom treinamento conceitual. Adicionalmente, essa visão equivocada muitas vezes conduz ao descrédito quanto aos resultados do uso dessa tecnologia.

## ORGANIZAÇÃO DO LIVRO

Esta obra foi concebida com o objetivo de apresentar ao leitor um modelo de desenvolvimento de produtos que contemple em suas etapas, a importante contribuição da simulação virtual. Os conteúdos apresentados, além da experiência prática dos autores, mostram um método de desenvolvimento de produtos inovador, que considera a simulação estrutural mecânica presente nas diferentes etapas da metodologia proposta, seguindo o modelo apresentado por Pahl *et al.* (2005), derivado da norma de projeto alemã VDI 2221, que é um modelo de desenvolvimento de produtos sintéticos, dividido em quatro fases. Desse modo, o modelo proposto considera diferentes tipos de simulação virtual, como análises tipo estática, dinâmica, não linear e de fadiga, tendo como proposta principal o desenvolvimento do produto com o “olhar” para a simulação estrutural.

O Capítulo 1 apresenta uma conceitualização, ressaltando a importância da utilização do método dos elementos finitos no desenvolvimento de novos produtos. O Capítulo 2 apresenta em detalhes o modelo proposto pelos autores, com explicações e instruções

para sua aplicação na prática. O Capítulo 3 apresenta uma série de exemplos (casos reais) de produtos desenvolvidos com a utilização da simulação virtual, para que o leitor tenha um apoio na compreensão do método, com quadros explicativos referentes a conceitos importantes que devem ser observados. O Capítulo 4 apresenta um estudo de caso completo de aplicação do desenvolvimento de um produto, com explicações adicionais relacionadas à utilização do modelo proposto na prática. Por fim, o Capítulo 5 apresenta um procedimento de implantação do método dos elementos finitos, mostrando os principais critérios e ações para implantar a simulação virtual em empresas que desenvolvem produtos industriais.

Algumas figuras desta obra são apresentadas em cores no site da editora Alta Books (acesse: [www.altabooks.com.br](http://www.altabooks.com.br) e procure pelo nome do livro ou ISBN), para que o leitor tenha uma visão clara dos panoramas de tensões e esforços, como se vê no software de análise. Sugerimos consultar essas figuras, pois elas representam os fenômenos físicos, demonstrando em cores de forma mais realísticas os resultados, como se veria no software.

Como observação adicional, vale citar que muitos diagramas onde foram construídos gráficos que representam fenômenos físicos, o objetivo não é apresentar em caráter detalhado os valores representados nas escalas das grandezas, mas apenas mostrar ao leitor a forma de variação dessas grandezas.

A Figura 1.21 mostra como o livro está organizado.

FIGURA 1.21 – Organização do livro.

