

Introdução ao CAE

Itamar Ribeiro Gomes, Dr. (DEC/CCT)
Marcelo da Silva Hounsell, PhD (DCC/CCT)

Roberto S. U. Rosso Jr., PhD

01/12/2021



Introdução ao CAe (1)

- “Um especialista em CAe seria o equivalente a ter um médico habilitado em todas as especialidades”
- Conteúdo
 - Introdução
 - Etapas do CAe
 - Tipos de Problemas
 - Vantagens e Desvantagens



Introdução ao CAe (2)

- O que é CAe ?
 - “Análises” de Engenharia Auxiliadas por Computador
 - Análises sobre modelos físicos e matemáticos complexos de interesse para a engenharia
 - Envolve equações diferenciais, funções não lineares, etc.
 - Não se baseia somente em informações geométricas



CAe *versus* CAD

- Apesar de algumas análises serem possível no CAD, este sistema se limita a efetuar alguns poucos cálculos que só usam a geometria como fonte de informações
- O CAe permite calcular/analisar fenômenos físicos que dependem não só da geometria mas também do material e de energias



Etapas do CAe

- Pré – Processamento
- Processamento
- Pós - Processamento



Etapas do CAe: Pré-processamento (1)

- Define-se a geometria (e sua simplificação)
- Define-se a discretização (malha)
- Define-se as propriedades do material
- Define-se fontes de energia (cargas) e restrições (apoios)



Etapas do CAe: Pré-processamento (2)

- Discretização da geometria através de uma malha de elementos finitos
 - A geração da malha nem sempre é bem feita
 - Problemas de adensamento ou geração de gaps
- Os resultados dependem da malha
- Esta etapa é semelhante ao CAD e muitas vezes parte dela é feita neste sistema.
- Precisa saber um pouco de engenharia

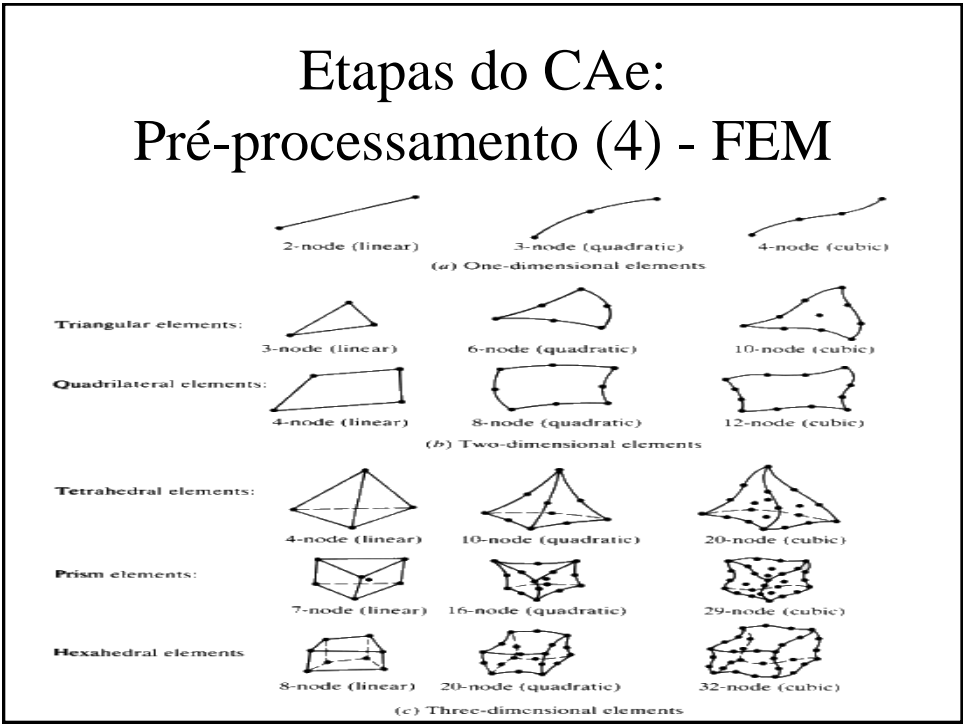


Etapas do CAe: Pré-processamento (3)

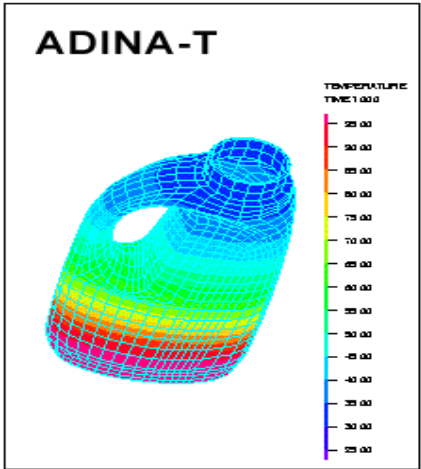
- Tipos de elementos finitos
 - 1D linear (vigas, cabos, análises rápidas)
 - 2D, plano de tensões e deformações
 - 3D, casca, chapas, 20 tipos diferentes
 - 3D, volume, 24 nós por elementos, 20 tipos
- A aplicação das malhas em alguns casos vem acrescido de simplificações na geometria (o que não interessa não entra)



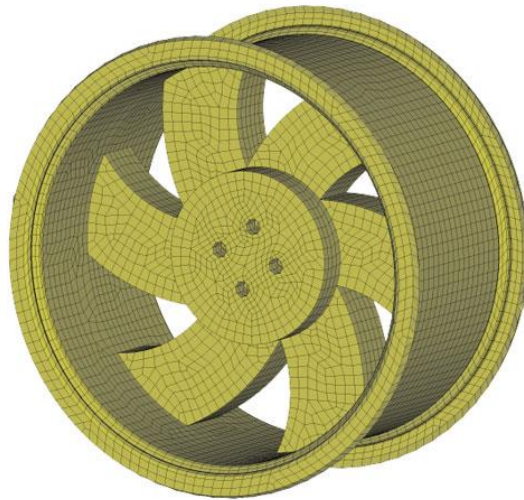
Etapas do CAe: Pré-processamento (4) - FEM



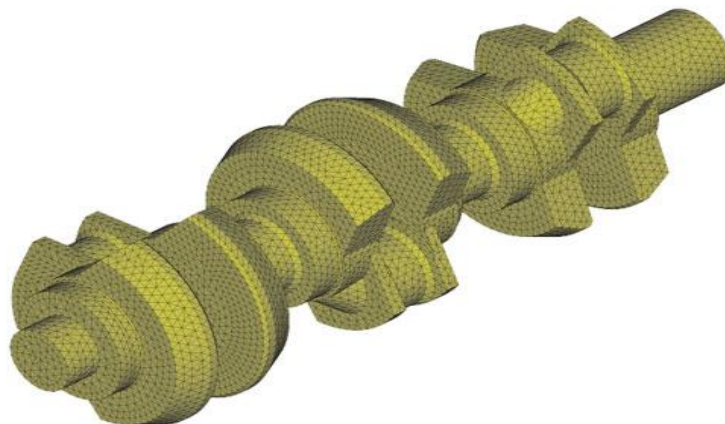
Elementos Casca Análise Térmica



Malha Tridimensional – *Brick* *element*



Malha com elementos 3D volume tetraédricos



Simplificação da Geometria (2)

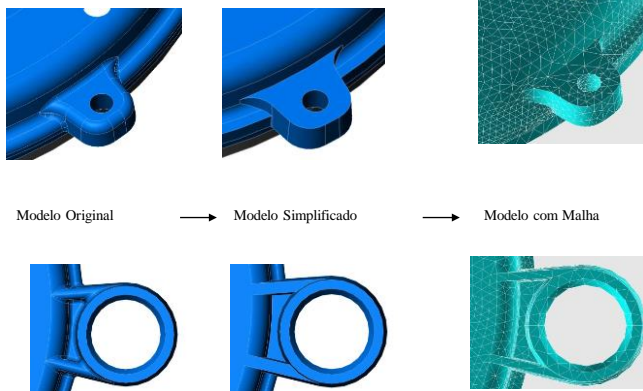
(Alex Sandro B. Passos, “CAE na WEG”, “5a na UDESC”, 25-11-2004)

- O objetivo é, quando possível, eliminar detalhes geométricos que são **claramente estéticos** e não influenciam na **funcionalidade** sendo avaliada, desta forma, diminuindo significativamente o **tempo** de processamento do CAE.
- Passa a ser importante que a modelagem do produto no CAD “facilite” a eliminação de certas características geométricas puramente estéticas (ex. arredondamentos)

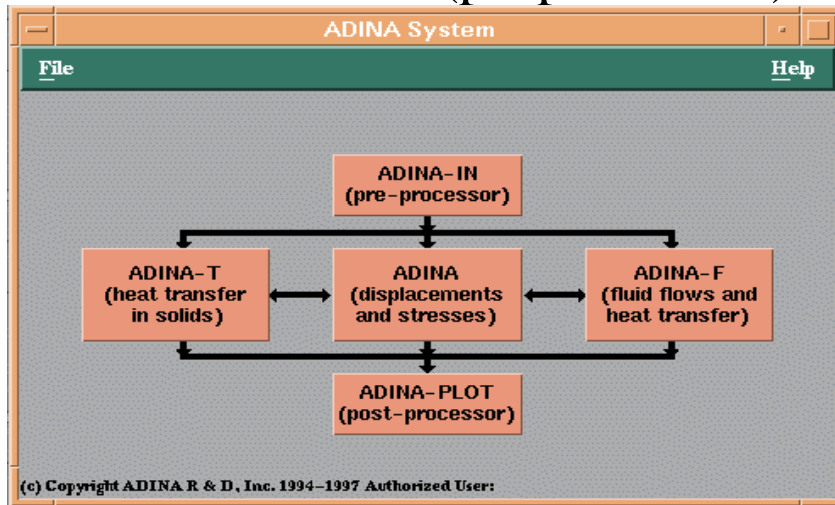


Simplificação da Geometria (2)

(Alex Sandro B. Passos, “CAE na WEG”, “5a na UDESC”, 25-11-2004)



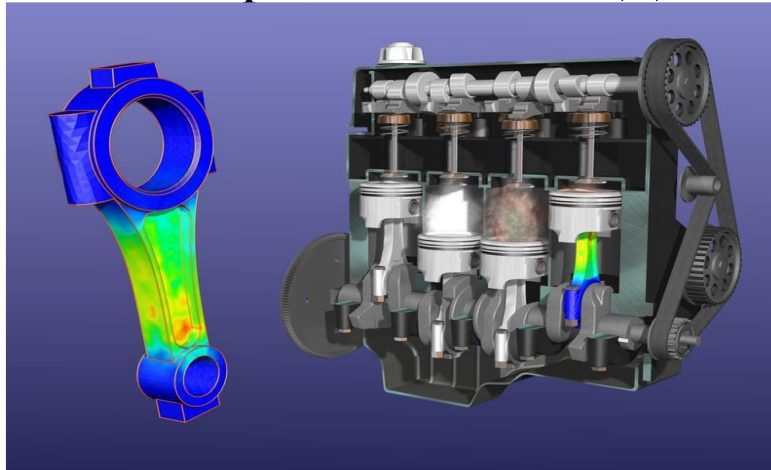
Etapas do CAe Processamento (propriamente)



Etapas do CAe: Pós-processamento (1)

- Após os cálculos tem-se uma massa enorme de valores numéricos representando o fenômeno em cada ponto dos “elementos”
- Então, mapeia-se os valores dos elementos sobre a geometria do objeto de 3 formas:
 - alterando a forma (produzindo deformações)
 - alterando a cor do objeto, baseado numa escala valor-cor configurável
 - as duas alternativas acima juntas.

Etapas do CAe: Pós-processamento (2)



Tipos de Problemas

- Problemas Estruturais Estáticos e Dinâmicos
- Análise de Fluídos
- Análises Térmicas
- Problemas Eletro-eletrônicos
- Problemas de Contato e Grandes Deformações
- Outros ...



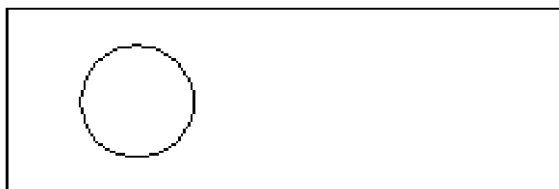
Problemas Estruturais Estáticos

- As cargas são estáticas ou aplicadas lentamente, não causando vibrações na estrutura.
 - Exemplo: cálculo das lajes de um edifício
- Os deslocamentos são considerados pequenos.
- Define-se a geometria, as propriedades dos materiais, cargas e apoios
- O objetivo é calcular tensões e deformações ou deslocamentos da estrutura
- A teoria é mais simples



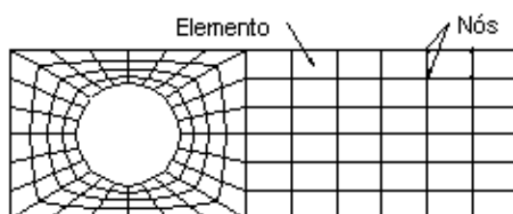
Problemas Estruturais Estáticos

Etapa 1: Definições da Geometria (CAD)



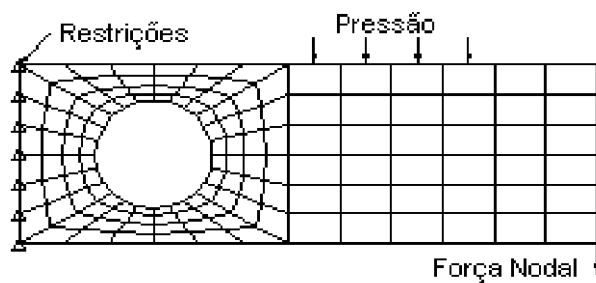
Problemas Estruturais Estáticos

Etapa 2: Definição da Malha (FEM)



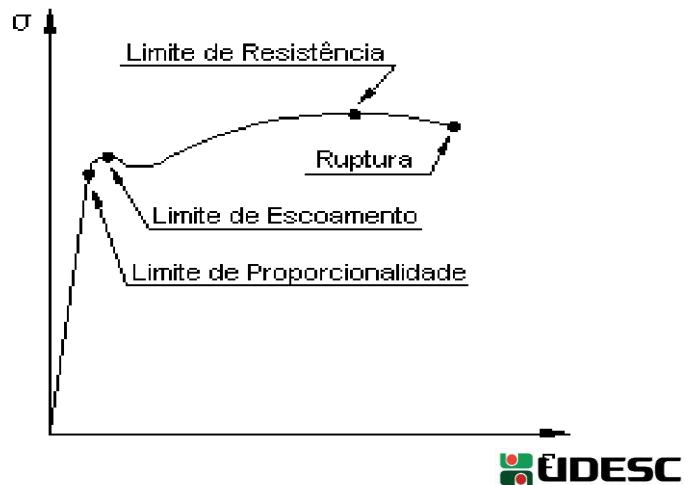
Problemas Estruturais Estáticos

Etapa 3: Definições das Cargas



Problemas Estruturais Estáticos

Etapa 4: Definições dos Materiais



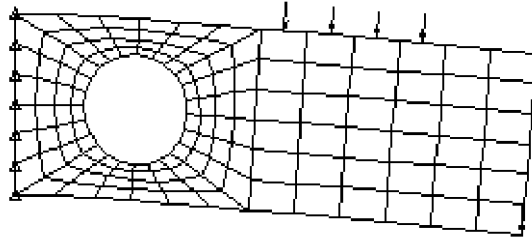
Problemas Estruturais Estáticos

Etapa 5

- PROCESSAMENTO ...
- CÁLCULO

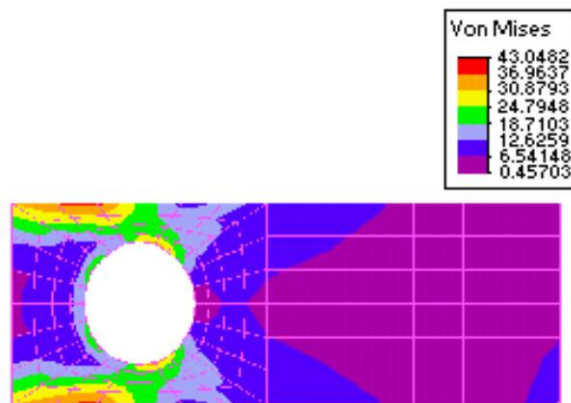
Problemas Estruturais Estáticos

Etapa 6: Resultados (Deslocamentos)

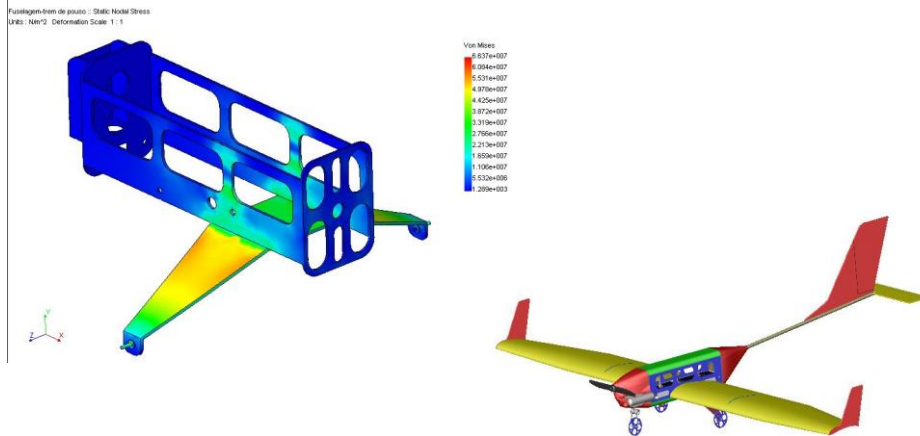


Problemas Estruturais Estáticos

Etapa 6: Resultados (Tensões)



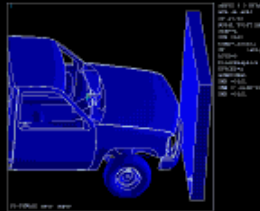
Cálculo Estrutural Estático 2 objetos trabalhando em conj.



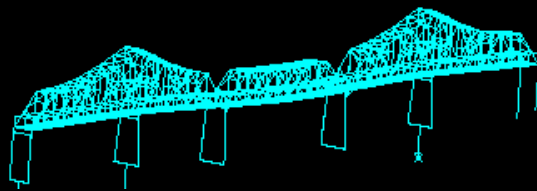
Problemas Estruturais Dinâmicos

- A principal diferença entre os problemas estáticos e dinâmicos, é que as cargas são aplicadas dinamicamente, podendo causar vibrações na estrutura. [Dinâmica = estática + carga(t)]
- As forças inerciais devem ser obrigatoriamente consideradas, tornando a teoria mais complexa.
- O objetivo é calcular tensões, deslocamentos, frequências, velocidades e acelerações.
 - Ver carro deformando-se (ADINA)

Problemas Estruturais Dinâmicos



Problemas Estruturais Dinâmicos



Análise Modal (1)

- Identifica as “Frequências Naturais ou de Ressonância”
- Exemplos
 - Caixa Torácica na Disco
 - Tropa atravessando uma Ponte
 - Em SC identificou-se a necessidade da reforma de uma represa pois havia uma fonte de vibração (fábrica) perto
 - 1940 o vento derrubou uma “ponte pênsil” que tinha 1,5 km e 853m de vão central (sensível a vibração)
- Aplicações
 - Projeto de motores, compressores, pontes, etc..



Análise Modal (2)

- É uma análise estrutural dinâmica sem carga
 - É uma característica do material e da sua geometria
 - Define-se o material, a geometria, modo de elasticidade, coef. de Poison e a distribuição da densidade dos materiais
- Quando é feito por ensaios físicos, a posição da excitação e do apoio pode influenciar o resultado necessitando de muita atenção na definição desta e da análise dos resultados (vide caso WEG)



Análise Térmica (1)

- A partir de uma fonte de calor, deseja-se determinar a distribuição de temperaturas em um corpo
- Esta distribuição depende das propriedades térmicas do material bem como de sua geometria
- O objetivo é determinar tensões e deformações no corpo

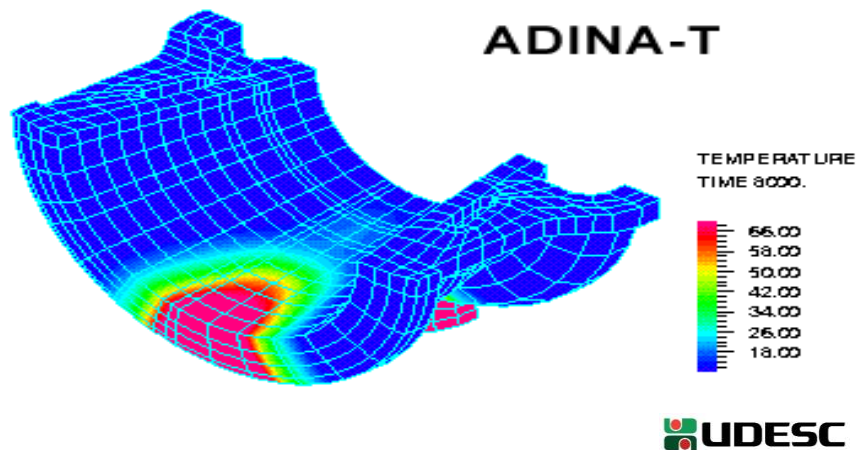


Análise Térmica (2)

- Exemplos
 - Conforme a distribuição térmica no corpo uma parte pode dilatar muito mais que a outra levando a criação de tensões prejudicando a vida útil e levando até a ruptura do objeto
 - Bloco do Motor -
 - Em trocadores de calor (condicionadores de ar, radiadores de carro, moldes de peças, cooler de computadores, arcos de transformadores) a dissipação térmica deve ser grandemente facilitada
 - Em um defletor de uma turbina é importante que a distribuição seja controlada apesar de nunca uniforme



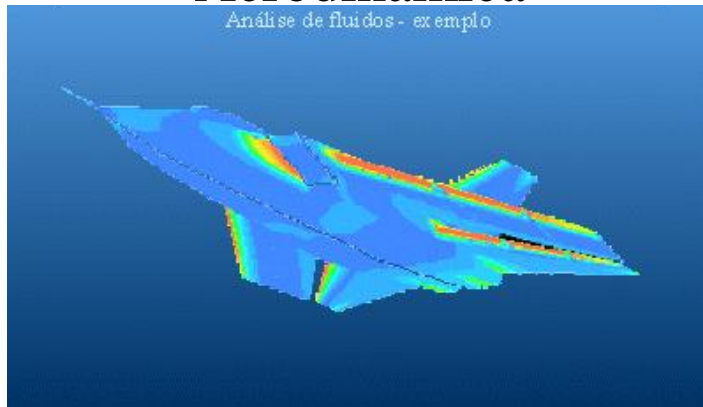
Análise Térmica em Turbinas



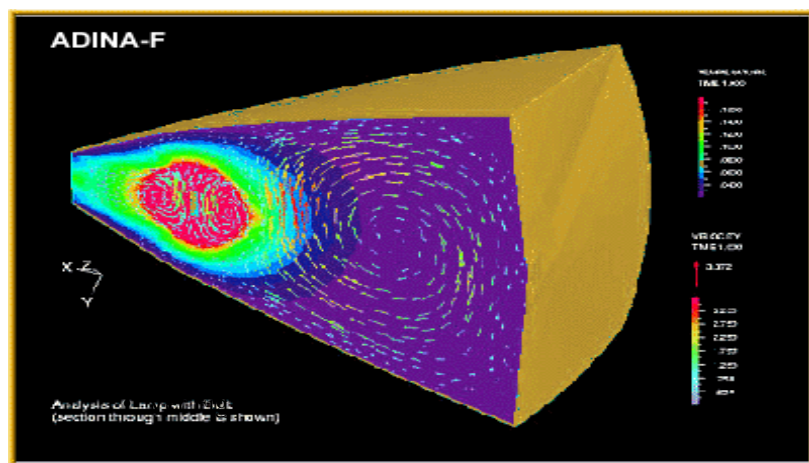
Análise de Fluídos

- O fluido pode estar em equilíbrio ou em movimento.
- Pode ser considerado incompressível (líquidos) ou compressível (gases)
- O objetivo é determinar as forças produzidas pelos fluidos em estruturas comuns de engenharia
 - Ex.: Análise aerodinâmica em aviões, Motobombas, Hélices, etc....

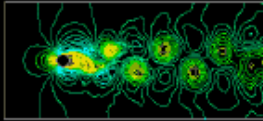
Análise de Fluidos: Aerodinâmica



Análise de Fluidos: Temperatura e Dinâmica



Análise de Fluidos



Análise de Fluidos

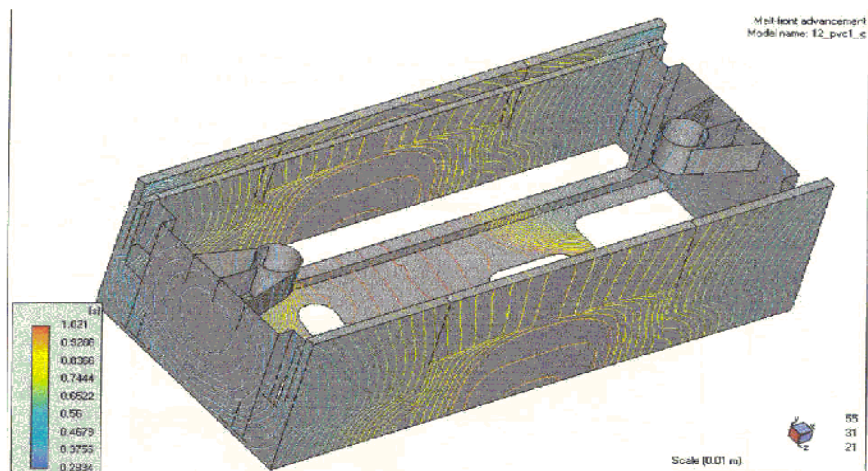


Análise de Fluidos: Processos de Injeção de Plásticos

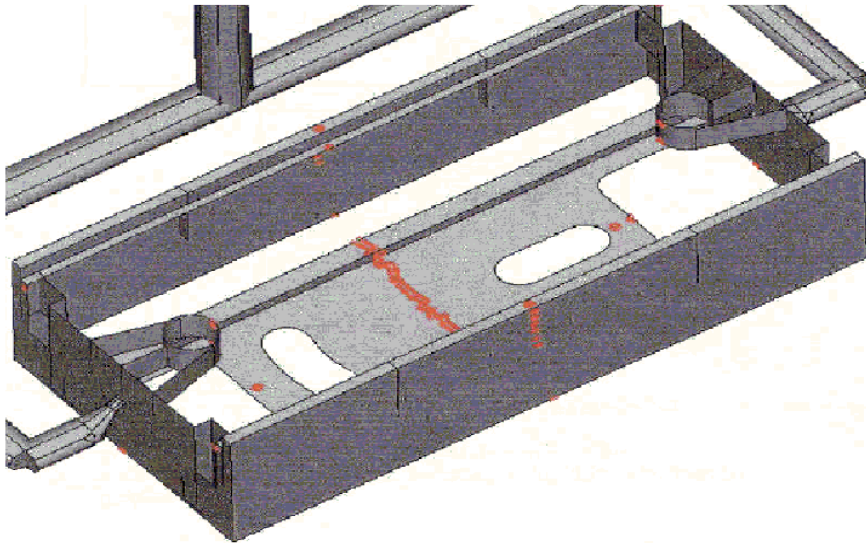
- Algumas das análises incluem
 - A frente de enchimento do molde,
 - Linhas de solda e de junções,
 - Pressão de injeção,
 - Força de fechamento,
 - Perfil de velocidade de injeção recomendado,
 - Temperatura do produto,
 - Temperatura do molde,
 - Eficiência dos canais de refrigeração,
 - Empenamentos



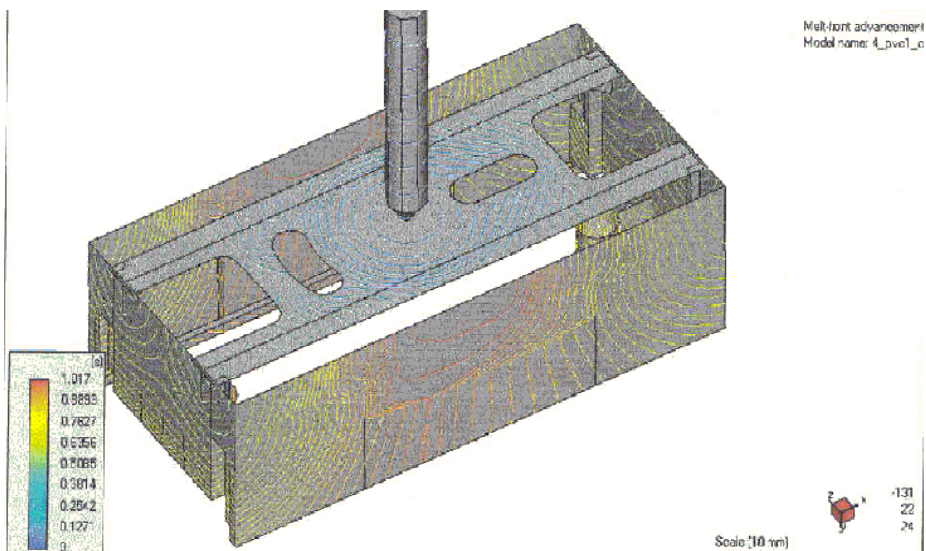
Frente-Ponto de Preenchimento



Saídas de AR



Frente-Ponto de Enchimento



Problemas Eletro-Eletrônicos

- Determinar (projetar) potencial, campos eletro-magnéticos, indutância, resistência elétrica, torque e força de motores elétricos, transformadores e reatores
- Análise térmica de materiais bi-polares, como circuitos eletrônicos
- Ex: Balança de Super Mercado (força *versus* resistência)

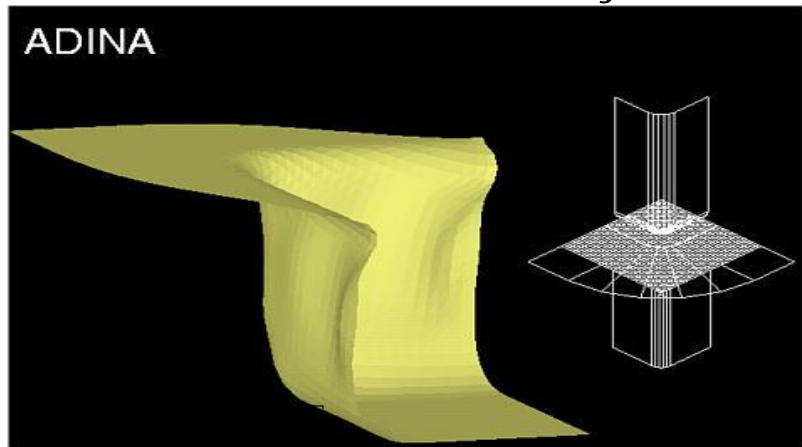


Problemas de Contato e Grandes Deformações

- Condições de contato entre sólidos elásticos
- As deformações são consideradas grandes, mas sem romper o material
- Esta análise é utilizada para simular processos metalúrgicos, estamparia, conformação, etc...
- Os problemas são mais complicados pois a teoria passa a ser não linear



Problema de Contato e Grandes Deformações



Outros Problemas

- Transferência de Calor e de Massa
- Lubrificação e Atrito
 - problema de interação fluido estrutura, porém mais sofisticado
- Plasticidade, Fadiga de Estrutura
- Resfriamento
- *Spring-back* (dobradura, extrusão)



Métodos Numéricos (1)

- Elementos Sólidos
 - Método dos Elementos Finitos
 - FEM = Finite Element Method
 - FEA = Finite Element Analysis
 - Método dos Elementos de Contorno
 - 1 software comercial
 - só considera o contorno do corpo
 - Reduz bastante o esforço computacional
 - Mais preciso que FEM em certos casos



Métodos Numéricos (2)

- Elementos Fluidos
 - Métodos das Diferenças Finitas
 - NASA, método mais antigo usado/preciso para fluidos
 - Não existe o conceito de elementos, só o de malhas
 - Métodos dos Volumes Finitos
 - Mais preciso que FEM para fluidos, método novo !
 - Se tem irregularidade na geometria fica então menos preciso que FEM
 - Meshless methods
- **Ao todo são mais de 500 métodos**



Método dos Elementos Finitos

Principais Características

- É o método mais popular comercialmente
- É o método que implementa uma teoria que possa ser representada por uma equação diferencial
- Representa qualquer tipo de geometria ou cargas, daí sua popularidade. Outros métodos devem ser reprogramados conforme a geometria



Problemas do FEM (1)

- Fontes de Erros na Malha
 - No Japão foi projetada uma das maiores Plataformas de Petróleo Flutuante cujo, um dos principais pontos críticos é o engastamento do cabo na plataforma.
 - O CAE foi utilizado mas com uma malha grosseira o que levou a um acidente e ao prejuízo de \$ 1bi.



Problemas do FEM (2)

- Fontes de Erros na Malha
 - Falta de adensamento em certos pontos
 - Erro no modelo matemático que não consegue representar o fenômeno físico (precisa entender de engenharia)
 - Escolha errada do elemento (1D, 2D, ...)
 - Imprecisões na representação da geometria



Limitações do FEM

- Não representa bem descontinuidades
 - mudança de tipo de material
 - ex.: aço P20 em contato com VM40
- O campo de tensões não é preciso
- Não considera bem mudanças na geometria
- Os resultados dependem muito da malha



Método de Elementos Finitos Softwares Comerciais (1)

- NASTRAN
 - USA, ++famoso, Mecânica
- COSMOS
 - Wizard, Microstation, SolidWorks
- ANSYS (Mecânica)
- DIANA (Só faz análise, CIVIL, 4K-5K)
 - Consegue representar as ferragens dentro das vigas
- ADINA (MIT, CIVIL)



Método de Elementos Finitos Softwares Comerciais (2)

- ABAQUS (CIVIL)
- CMOLD/MOLDFLOW (Plásticos)
- DynaPAK (Algor, Mecanismos)
- Working Model (Mecanismos)



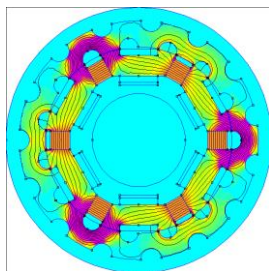
Método de Elementos Finitos Softwares Comerciais (3)

- SYSNOISE (vibrações)
- Fluent (Dinâmica de Fluídos)
- CFX (Fluídos)
- Magma (Fundição)
- PATRAN
- ALGOR
- ADAMS
- FEMAP
- etc.....



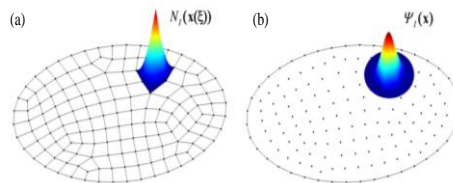
Métodos Numéricos Meshless

Problema de Remeshing



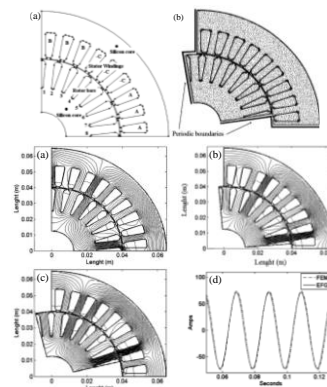
Métodos Numéricos Meshless

- *Classe de métodos;*
- *Discretização feita por nuvem de nós;*
- *Sem necessidade de relação entre os nós;*
- *Independência de malha;*
- *Maior complexidade computacional;*
- *Ideal para problemas com grandes movimentações e deformações;*
- *Sem necessidade de pós-processamento.*



Métodos Numéricos Meshless

- Simulação de motor indução trifásico do tipo gaiola de esquilo;
- Modelagem da máquina elétrica, movimentação do rotor e condições de contorno;
- Comparação de simulação com rotor bloqueado com o método FEM.



CAe - Vantagens (1)

- Aumento de produtividade pela velocidade dos cálculos
- Ampliação do escopo dos problemas
 - Antes calculava-se laje por laje num edifício, hoje calcula-se o andar inteiro.
- Ampliação da sofisticação dos problemas
 - Antes avaliava-se um fenômeno de cada vez, agora pode-se considera-los conjuntamente



CAe - Vantagens (2)



Simulação da flambagem de uma lâmina. Tem-se a combinação das análises estática e dinâmica com análises de tensões lineares e não-lineares por elementos finitos

O resultado pode ser analisado através de uma animação realista



CAe - Vantagens (3)

- Aumento da qualidade pela quantidade de informações obtidas
- Os erros podem ser eliminados na fase de projetos, reduzindo o retrabalho
- Maior precisão e confiabilidade pois o computador não comete erros em processos repetitivos e pode fazê-los com alto grau de detalhamento



CAe - Vantagens (4)

- Economia de \$
 - Diminuição dos níveis de tolerância pelo aumento da confiabilidade
 - Calota do carro (40% do peso, *mesma resistência*)
 - Os testes de campo passam a ser mera “verificação de campo” ou tem-se a diminuição drástica no número de protótipos de teste para atender a legislação/certificação
- Possibilita a geração do Mock-Up Digital ou DMU (em inglês)



CAe - Desvantagens

- Dependendo do problema (Linear, Geometria Simples, Estático, Já bem estudado/conhecido), pode-se comprometer a relação custo benefício
- Exige mão-de-obra especializada ****
- Os programas comerciais não atendem a todas as necessidades específicas
- Tempo de aprendizagem grande (maturidade)

