Requisitos para a execução de Análise de Tensões pelo Método de Elementos Finitos (MEF)

Por Patrício e Freire - Petrobras

1- Escopo

1.1- Quando for necessária uma Análise de Tensões pelo Método de Elementos Finitos (MEF), o Relatório de Memória de cálculo de análise de tensões deverá ser enviado para aprovação do Proprietário.

1.2- A análise pelo Método de Elementos Finitos (MEF) deverá estar de acordo com os procedimentos da Parte 5 do ASME VIII-2. No caso de componente de equipamento projetado pelo ASME VIII-1, os valores das tensões admissíveis devem ser correspondentes aos das Tabelas 1A e 1B do ASME Sec. II Part D.

2- Relatório de memória de cálculos de análise de tensões pelo método de elementos finitos

Todo relatório de memória de cálculos de análise de tensões pelo método de elementos finitos deve ser composto no mínimo dos seguintes itens:

a- Descrições do problema
b- Documentos de referência
c- Dados da análise
d- Tipos de análise realizada
e- Modelo de elementos finitos
f- Resultados obtidos na análise
g- Conclusões
h- Recomendações
i- Referências Bibliográficas
j- Anexos.

2.1- Descrição do problema

O projetista deve descrever:

- O equipamento e/ou componente a ser analisado;
- A motivação da análise numérica pelo MEF, justificando porque apenas a análise de tensões analítica não é satisfatória;
- Explicar o comportamento estrutural do componente a ser analisado;
- O tipo de análise a ser realizada;
- Os carregamentos envolvidos;
- O programa de elementos finitos utilizado e sua versão.

2.2- Documentos de referência

Devem ser listados todos os documentos de referência utilizados na análise, tais como:

- O código utilizado no projeto do equipamento e sua addenda;

- Os desenhos ou folhas de dados de onde foram coletados os dados sobre a geometria, os materiais e as condições de operação e de projeto do equipamento;
- Outras fontes de informação utilizadas para a elaboração do modelo de análise e/ou para definição das condições de verificação. Esses documentos, como por exemplo: folhas de dados com carregamentos externos de tubulações, normas, catálogos, mensagem de e-mail, fax etc., deverão ser incluídos no Anexo.

2.3- Dados da análise

2.3.1- Os seguintes dados de entrada (quando aplicáveis),devem ser informados na forma de uma tabela resumo, com seus respectivos valores e a fonte da informação coletada:

- Pressão de operação, de projeto e PMA (pressão máxima admissível), ou a curva de pressurização;
- Temperaturas: inicial, de operação e de projeto, ou a curva com o transiente de temperatura;
- Coluna de líquido;
- Densidade do líquido;
- Pesos nas diferentes condições de análise;
- Carga de vento;
- Sobreespessura para corrosão;
- Especificações dos materiais, incluindo refratários e isolamentos térmicos;
- Tensões admissíveis do ASME II-D (temperatura ambiente e temperatura de avaliação);
- Módulo de elasticidade (temperatura ambiente e temperatura de avaliação);
- Tensão de escoamento (temperatura ambiente e temperatura de avaliação);
- Tensão de ruptura;
- Coeficientes de dilatação térmica (variando com a temperatura quando for o caso);
- Coeficiente de película (variando com a temperatura quando for o caso);
- Coeficientes de transmissão de calor interno e externo com as respectivas temperaturas bulk;
- Coeficiente de Poison.

2.3.2- Deve ser montada uma tabela com os esforços externos considerados para cada caso de análise.

2.3.3- No caso de análise não-linear, justificar o modelo de material utilizado, informando os comandos utilizados e os valores dos parâmetros.

2.3.4- No caso de análise linear elástica deve ser montado um quadro resumo dos valores admissíveis de todas as tensões primárias e secundária a serem utilizadas para cada condição de avaliação das tensões atuantes.

2.4- Tipos de análises realizadas

2.4.1- Descrever o(s) tipo(s) de análise(s) realizada(s), justificando a escolha da(s) mesma(s) e explicando as simplificações conceituais assumidas.

2.4.2- Dependendo das condições de carregamento, uma análise térmica para determinação do perfil de temperatura no componente e as tensões térmicas geradas pode ser requerida em conjunto com a análise estrutural.

2.5- Modelo

2.5.1- Descrever o modelo de elementos finitos gerado e sua extensão, justificando e explicando as simplificações adotadas na modelagem, como por exemplo: simetria, axissimetria, estado plano, etc. Além disso, há necessidade de justificar as hipóteses de comportamento, tais como, condições de contato, equações de acoplamento de graus de liberdade, coeficientes equivalentes de troca térmica, etc.

2.5.2- Informar os tipos de elementos usados e os seus nomes de referência na biblioteca de elementos do programa. Explicar o motivo da escolha.

2.5.3- Montar uma tabela de descrição do modelo, contendo as seguintes colunas:

- Nome dado a cada componente do modelo;
- Tipo de elemento adotado em cada componente e sua numeração de referência no modelo;
- Nome de referência na biblioteca de elementos do programa;
- Constante Real associada de cada componente (quando for o caso) e sua numeração de referência no modelo;
- Material associado a cada componente e sua numeração de referência no modelo;
- Quantidade de elementos de cada componente.

2.5.4- Montar uma tabela de Constantes Reais (quando for o caso), contendo as seguintes colunas:

- Numeração de referência da constante real associada ao componente;
- Espessura, para o caso de elementos de cascas;
- Propriedades da seção plana, para o caso de elementos viga;
- Localização do componente associado à constante real.

2.5.5- Montar uma tabela de Materiais, contendo os seguintes itens:

- Numeração de referência do material associado ao componente;
- A especificação do material;
- o módulo de elasticidade, variando com a temperatura (quando aplicável);
- Demais propriedades (coeficiente de dilatação térmica, condutibilidade térmica etc.), variando com a temperatura (quando aplicável).

2.5.6- Apresentar plotagens do modelo geométrico, mostrando:

- Os elementos com seus materiais associados;
- Os elementos com seus tipos associados;
- Os elementos com suas constantes reais associadas;
- As áreas com suas normais, para o caso de modelo com elementos de casca;

- A malha de elementos evidenciando as regiões de refinamentos.

2.5.7- Informar o tamanho médio dos elementos nas regiões de interesse e a descrição completa dos critérios e controles adotados na definição do refinamento da malha.

2.5.8- Aplicação dos Carregamentos

2.5.8.1- Listar todos os carregamentos aplicados e suas combinações dos casos simulados (load-step) avaliados, explicando como cada carregamento foi aplicado em cada rodada do programa.

2.5.8.2- Devem ser descritos como os seguintes carregamentos foram aplicados ao modelo de elementos finitos:

- Pressão;
- Temperatura e/ou gradiente de temperatura;
- Carga de vento;
- Esforços nos bocais
- Pesos de peças internas ou externas;
- Carregamento para simular a tensão longitudinal de fundo de tampo
- Cargas concentradas;
- Cargas de superfície (ex.: coeficiente de película);
- Cargas de inércia;

2.5.8.3- Mostrar plotagens que comprovem como os carregamentos foram considerados e aplicados ao modelo.

2.5.9- Aplicação de Condições de contorno

2.5.9.1- Justificar as condições de contorno adotadas em cada caso simulado, explicando como as mesmas foram aplicadas ao modelo.

2.5.9.2- Justificar o uso de condições de simetria e anti-simetria (quando aplicável), mostrando graficamente as regiões, arestas ou faces de simetria do modelo.

2.5.9.3- Em análise onde for modelado o contato entre as partes, descrever como o mesmo foi considerado e justificar o comportamento esperado do modelo.

2.5.9.4- Em análise que for utilizada equações de acoplamento de graus de liberdade, descrever como a mesma foi considerada e justificar o comportamento esperado do modelo.

2.5.9.5- Mostrar plotagens que comprovem como as condições de contorno foram consideradas e aplicadas ao modelo.

2.5.10- Em análise não-linear ou transiente descrever e justificar todos os parâmetros de ajustes usados na análise, tais como, o tipo de “solver”, seleção de grande deslocamento ou pequenos deslocamentos, método de interação, a quantidade de “load-steps” e número interações, modo de aplicação do carregamento, condições de parada da rodada, etc.

2.6- Resultados obtidos na análise

2.6.1- Mostrar plotagens da deformada do modelo para cada caso de carga (“load-step”), explicando se o aspecto das deformadas corresponde à expectativa no que se refere às direções, sentido e natureza dos carregamentos aplicados em

cada “load-step”. A legenda das plotagens deve mostrar o erro percentual na forma de energia (SEPC), que é um dos indicativos de qualidade do refinamento da malha, cujo valor deverá ser menor que 10% para as regiões de interesse.

2.6.2- Verificar se as reações de apoio correspondem aos carregamentos aplicados para cada caso de carga (“load-step”). A soma das forças de reação em cada direção deve ser igual à soma das forças aplicadas naquela direção.

2.6.3- Mostrar plotagens dos resultados de deslocamentos UX, UY e UZ no sistema de coordenadas (de plotagem) adequado, para cada “load-step”, identificando e comentando os valores considerados importantes para a análise dos resultados em função dos carregamentos aplicados. Em alguns casos será necessário comparar os resultados de deslocamentos com possíveis limites admissíveis.

2.6.4- Mostrar plotagens dos resultados de tensões atuantes de membrana e de flexão; SX, SY, SZ, S1, S2 e S3 no sistema de coordenadas (de plotagem) adequado, para cada “load-step”, identificando e comentando os valores máximos obtidos, considerados importantes para a análise dos resultados, em função dos carregamentos aplicados.

2.6.5- Demonstrar que alguns resultados obtidos são compatíveis com cálculos analíticos, dados experimentais ou resultados da literatura.

2.6.6- Mostrar plotagens dos resultados de tensões equivalentes de von Mises de membrana e de flexão, para cada ”load-step“ evidenciando os valores máximos obtidos, considerados importantes para a análise dos resultados, e compará-los com os limites admissíveis.

2.6.7- Para o caso de análise transiente, mostrar gráficos no domínio do tempo da variação das tensões, deslocamentos e temperatura (quando aplicável) de interesse para os pontos (nós) selecionados. Justificar a escolha dos pontos (nós) e das tensões e deslocamentos de interesse, comentando esses valores em função dos carregamentos aplicados e comparando-os com possíveis limites admissíveis.

2.6.8- Para o caso de análise de fadiga, identificar os pontos da estrutura mais sujeitos à fadiga e os instantes de tempo que levem ao maior range de tensão, de forma a considerar a pior situação. Para os pontos e os instantes de tempo identificados, mostrar gráficos da variação das componentes de tensão e as plotagens dessas tensões.

2.6.9- Montar tabelas resumidas de resultados, para cada “load-step”, constando as seguintes colunas:

- Nome dado ao componente;
- Material;
- Temperatura;
- Classificações da tensão;
- Limites admissíveis;
- Valor atuante da tensão equivalente de von Mises.

2.7- Conclusão

Informar as conclusões da análise para os carregamentos avaliados.

2.8- Recomendações

Informar as recomendações, no caso de necessidade de reforços da estrutura ou restrição de algum tipo de carregamento e quaisquer outras recomendações pertinentes.

2.9- Referências Bibliográficas

Informar as fontes de consultas utilizadas na análise, tais como artigos, livros etc.

2.10- Anexos

Anexar todos os documentos com informações importantes utilizadas na análise, tais como, folhas de dados com carregamentos externos de tubulações, trechos de normas, trechos de catálogos, mensagem de e-mail, fax etc.