

6 Conclusões e sugestões

6.1. Conclusões

Os diversos estudos numéricos apresentados neste trabalho permitiram uma visão qualitativa do efeito de amortecimento no comportamento dinâmico de peças comprimidas.

Este trabalho confirma que a carga crítica dinâmica da coluna de Beck é fortemente afetada pelo amortecimento. Seria de esperar que essa carga crítica sempre fosse superior à do caso sem amortecimento. Entretanto, no caso de amortecimento proporcional à rigidez, valores pequenos de amortecimento conduzem a uma carga crítica menor que a carga de “flutter” sem amortecimento, fenômeno conhecido como paradoxo de Ziegler. No caso de amortecimento de Rayleigh completo, ou seja, amortecimento proporcional à rigidez e à massa, o paradoxo de Ziegler não é mais observado.

Duas características importantes foram aqui observadas em vigas curtas que levam em conta a deformação cisalhante. Em primeiro lugar, a diminuição da carga crítica dinâmica com pequenas quantidades de amortecimento é menor do que no caso de vigas que seguem a hipótese de Euler-Bernoulli. Em segundo, e ainda mais interessante, nas vigas que levam em conta a deformação cisalhante, a carga de “flutter” não se incrementa indefinidamente com o acréscimo do amortecimento. A carga crítica atinge um limite e a partir de um determinado valor de amortecimento o incremento na carga de “flutter” é significativamente reduzido. Além deste valor de amortecimento, um alto modo de vibração passa a ter pelo menos um valor positivo do expoente característico praticamente com o mesmo valor de carga crítica.

Observa-se, como indicado acima, que em vigas de Timoshenko um alto modo de vibração limita a carga crítica, ao passo que nas vigas de Euler-Bernoulli a carga crítica aumenta indefinidamente com o acréscimo de amortecimento.

Neste último caso, a flambagem apresenta-se através de oscilações exponencialmente crescentes do primeiro modo de vibração.

Em vigas sem amortecimento, o incremento rápido nos deslocamentos nas respostas no tempo praticamente coincide com a ocorrência do primeiro número positivo da parte real do expoente característico. Esta correspondência não se observa em geral em vigas com amortecimento, onde o incremento rápido de deslocamentos aparece na maioria das vezes depois do primeiro número positivo da parte real de s . Uma razão que poderia explicar esta diferença é que o crescimento do valor positivo da parte real é maior e mais íngreme em vigas sem amortecimento daquele observado em vigas com amortecimento (em alguns casos pode-se ver nas vigas com amortecimento uma maior inclinação da parte real um tempo depois da carga crítica).

Vigas com amortecimento viscoelástico apresentam um comportamento similar às vigas com amortecimento proporcional à rigidez. Poder-se-ia esperar esta semelhança pois o amortecimento proporcional à rigidez é considerado como uma forma de amortecimento interno enquanto que o amortecimento viscoelástico é introduzido na forma de uma relação constitutiva do material. Assim, o paradoxo de Ziegler pode também ser observado em vigas com amortecimento viscoelástico.

Neste trabalho também se verificou a afirmativa de Bolotin e Zhinzher (1969) de que o incremento da carga de “flutter” com o incremento do coeficiente de amortecimento depende da relação entre o módulo de cisalhamento instantâneo e módulo de cisalhamento de longo prazo. O modelo de Kelvin com esta relação igual a infinito é o limite superior. No limite inferior, quando a relação tende à unidade, somente amortecimento infinitesimal pode ser aplicado independentemente da constante de amortecimento viscoso. Portanto, próximo ao limite inferior, a carga crítica é sempre menor que a carga de “flutter” sem amortecimento (paradoxo de Ziegler).

Um resultado particularmente interessante mostra que, se o amortecimento viscoelástico é aplicado às deformações desviadoras, a carga crítica dinâmica apresenta um limite, comportamento semelhante ao observado no caso de vigas com amortecimento proporcional que levam em conta a deformação cisalhante. A partir deste limite o incremento de carga crítica é imperceptível com o incremento do amortecimento.

Fisicamente o paradoxo de Ziegler parece indicar que as forças devidas ao amortecimento, por serem não conservativas, introduzem mais energia no sistema do que conseguem dissipar, nos casos em que a quantidade de amortecimento é pequena.

Observa-se que quando a coluna de Beck é modelada com elementos de viga de Euler-Bernoulli, à medida que a carga seguidora aumenta, o primeiro e segundo modos de vibração se aproximam um do outro, não somente na frequência de vibração, mas também na própria forma modal. Após da carga crítica dinâmica, a união dos dois primeiros modos resulta em um modo de vibração cujas amplitudes se incrementam exponencialmente.

Na perda de estabilidade por “flutter”, a duração do movimento oscilatório é em geral pequena, portanto o cálculo da carga crítica dinâmica com o módulo de rigidez de longo prazo não representa um limite superior da carga crítica, como acontece na perda de estabilidade por divergência.

No que se refere ao algoritmo de integração utilizado para modelar o comportamento viscoelástico, é importante mencionar que para garantir a convergência nos resultados, é necessário que o intervalo de tempo adotado seja menor do que o tempo de relaxação do material. Nos exemplos analisados, intervalos de tempo menores do que a quinta parte do tempo de relaxação foram encontrados satisfatórios. Isto significa que são necessários intervalos de tempo muito pequenos para modelar materiais viscoelásticos que têm o módulo instantâneo significativamente maior do que o módulo a longo prazo. Portanto, seria mais razoável utilizar um método de integração explícita quando o comportamento do material viscoelástico se aproxima àquele do modelo Kelvin. Neste caso, a vantagem da integração implícita, que permite adotar intervalos de tempo maiores, vê-se limitada pelo algoritmo de integração da lei constitutiva do material.

A modelagem de tubos com elementos tridimensionais mostra-se uma alternativa interessante, principalmente nos casos em que as deformações da seção transversal são significativas, na modelagem de tubos com várias camadas, cada uma com sua própria lei constitutiva, ou quando se torna importante uma melhor representação das condições de contorno e das pressões aplicadas na superfície. O uso de elementos com modos incompatíveis permite reduzir significativamente o

número de elementos necessários na modelagem, diminuindo o tempo de processamento numérico.

Esses elementos conseguem representar o comportamento de materiais quase incompressíveis, característica de vários materiais viscoelásticos poliméricos. Além disso, não apresentam o problema conhecido como “shear locking” devido ao enriquecimento do seu campo de deformações.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

O objetivo principal deste trabalho foi um estudo qualitativo dos resultados teóricos obtidos com amortecimento proporcional e viscoelástico, considerando diferentes hipóteses na aplicação do amortecimento e do comportamento das vigas e tubos. Assim, os exemplos foram limitados a problemas teóricos com poucos graus de liberdade.

Com a implementação das rotinas numa linguagem de programação como Fortran, por exemplo, seria possível comparar as análises numéricas com testes experimentais em tubos compostos por várias camadas de material, cada uma com sua própria lei constitutiva e grau de amortecimento.

Da mesma forma, as análises com elementos tridimensionais precisam da implementação de uma rotina em outra linguagem de programação para calcular a carga crítica dinâmica através do problema de autovalor polinomial característico.

Condições de contorno de contato poderiam ser incorporadas para estudar a estabilidade de tubos apoiados em uma camada de solo através de análises tridimensionais.

Um problema interessante, porém mais complexo, que poderia ser investigado com o uso de elementos tridimensionais, é a estabilidade dinâmica considerando interação entre o fluxo interno e a estrutura. Nas análises teóricas com elementos unidimensionais, a velocidade crítica do fluxo interno é calculada adicionando nas equações termos relacionados com forças centrífugas e forças de Coriolis, que pertencem ao comportamento do fluido. Em uma análise tridimensional a modelagem destes efeitos seria incluída de forma mais direta e apropriada.