

5 Conclusões e Sugestões

Apresentou-se um procedimento computacional aplicável à análise da estabilidade de sistemas estruturais viscoelásticos. A formulação incremental desenvolvida inclui o efeito viscoelástico e considera um comportamento cinemático caracterizado por grandes deslocamentos e pequenas componentes de deformação. O programa computacional, implementado em linguagem Fortran, baseia-se em um elemento finito isoparamétrico bidimensional que permite a estudo de diferentes sistemas estruturais, incluindo colunas, pórticos, arcos e cascas axissimétricas.

Utilizou-se um esquema de controle de carga que permitiu o traçado de trajetórias de equilíbrio de modelos elásticos. Através dos exemplos de validação do programa (Seção 4.1), verificou-se a eficiência desse esquema de controle em relação à ultrapassagem de pontos-limite e de pontos de bifurcação presentes nas trajetórias de equilíbrio, mesmo sem o emprego de procedimentos iterativos de correção. Deve-se ressaltar que o conhecimento prévio das soluções dos exemplos da Seção 4.1 facilitou a aplicação do procedimento numérico adotado. Na prática, porém, quando se trata da análise não-linear geométrica, a complexidade das estruturas reais requer o emprego de esquemas de solução numérica mais sofisticados, embora uma estratégia mais simples possa ser utilizada como parte da análise.

A questão da ordem de integração foi discutida na Seção 4.3. Verificou-se que a integração reduzida (4 pontos de integração em elementos com 8 nós) fornece melhores resultados, com diferenças significativas nos exemplos da coluna e dos arcos.

Ainda com o objetivo de validar o programa, verificou-se a resposta viscoelástica de uma barra submetida a uma força axial variável no tempo e a relaxação da tensão axial em uma barra indeslocável submetida a uma variação de temperatura constante no tempo. Em relação aos modelos que envolvem não-linearidade geométrica e viscoelasticidade, fez-se a verificação através do

exemplo da coluna viscoelástica submetida a uma imperfeição inicial, cuja solução é conhecida. Os exemplos adicionais da Seção 4.2 apresentaram características particulares, que já foram discutidas no Cap. 4 e serão resumidas a seguir.

No caso do pórtico viscoelástico (Ex. 4.2.4), observou-se um mecanismo de flambagem caracterizado por um “salto” que ocorre em sentido contrário ao da aplicação da carga. Vale observar que o mesmo comportamento ocorreu quando 9 pontos de integração foram utilizados.

No caso do arco abatido viscoelástico (Ex. 4.2.5), observou-se uma diferença significativa entre as respostas segundo as componentes de deslocamento vertical e horizontal no topo do arco, pois somente a resposta segundo a componente horizontal mostrou indícios de instabilidade desde os instantes iniciais, como no exemplo da coluna viscoelástica. Baseando-se no fato de que a componente horizontal está relacionada à flambagem assimétrica, acionada a partir de um ponto de bifurcação (primeira carga crítica), pode-se sugerir um dado qualitativo em relação à flambagem viscoelástica: em um sistema estrutural constituído por material viscoelástico linear, cuja primeira carga crítica elástica corresponde a um ponto de bifurcação, ocorre uma resposta semelhante a da coluna viscoelástica do Ex. 4.1.3, independentemente da não-linearidade da trajetória que antecede a bifurcação. Essa semelhança, porém, não é observada para qualquer grau de liberdade, mas apenas para graus de liberdade associados à ocorrência da bifurcação.

No caso do arco elevado viscoelástico (Ex. 4.2.6), a flambagem é comandada por deslocamentos críticos, que independem do valor da carga aplicada e que são aproximadamente iguais aos deslocamentos críticos da flambagem elástica. Um problema semelhante é discutido por Rabotnov (1969).

No caso do cilindro axissimétrico viscoelástico (Ex. 4.2.8), observou-se a existência de uma componente de deslocamento horizontal que apresenta, ao longo do tempo, inversão do sentido, enquanto o deslocamento axial do topo do cilindro cresce continuamente ao longo do tempo. Deve-se observar que essa inversão ocorreu para valores de carga menores que a carga crítica viscoelástica, em decorrência da associação entre os efeitos da não-linearidade geométrica e da viscoelasticidade. Esta seria uma particularidade associada ao cilindro, uma vez

que, nos demais exemplos, as trajetórias pré-críticas não apresentaram desvios significativos entre os casos elástico e viscoelástico.

Os exemplos indicam que as trajetórias pré-críticas elásticas e viscoelásticas não envolvem grandes disparidades de bifurcações. Com base nessa observação, pode-se concluir que a utilização do módulo efetivo é válida para definir a carga crítica de longa duração. Nos Exs. 4.2.3 a 4.2.8, utilizou-se um módulo efetivo dado pela metade do módulo instantâneo ($E_{\infty} = E/2$). Para todos esses exemplos, é possível verificar, às vezes com o auxílio dos gráficos semi-log, que a instabilidade somente ocorre para valores de $\beta \geq 0.5$. Em outras palavras, a estabilidade, segundo as condições estabelecidas no Cap. 2, é garantida para valores de $\beta < 0.5$.

Trabalhos futuros podem utilizar o modelo computacional desenvolvido e incluir modelos viscoelásticos não-lineares.