Análise Dinâmica - TQS

Introdução

Tradicionalmente, as estruturas da Engenharia Civil são analisadas supondo-se as cargas atuantes aplicadas muito lentamente. Tal hipótese é a base da análise estática, sendo apropriada para o tratamento, por exemplo, de ações como o peso próprio.

No entanto, nos casos em que as ações são variáveis no tempo, tais como a incidência de vento sobre edifícios altos, sismos, frenagem / aceleração de veículos em pontes e movimentos de pessoas (caminhar, pular, dançar) sobre uma laje, os efeitos dinâmicos podem ser importantes, devendo ser considerados no projeto.

A evolução dos processos de cálculo estrutural aliada ao desenvolvimento de materiais mais resistentes propicia a execução de estruturas cada vez mais esbeltas e flexíveis. Tais estruturas são mais susceptíveis a ações variáveis no tempo. Observando esta tendência, a NBR 6118 (NB1-2001) trata, no seu capítulo 23, de ações dinâmicas e de fadiga. A inclusão desse capítulo na norma de projeto de estruturas de concreto representa um avanço. Nele, a nova NB1 prescreve que a freqüência fundamental de estruturas sujeitas a vibrações sejam superiores a certos limites, que dependem da destinação da respectiva edificação.

Dentro deste contexto, a TQS implementou na última versão do sistema um módulo de análise dinâmica. Através deste módulo, é possível a determinação dos modos e freqüências naturais de pórticos espaciais.

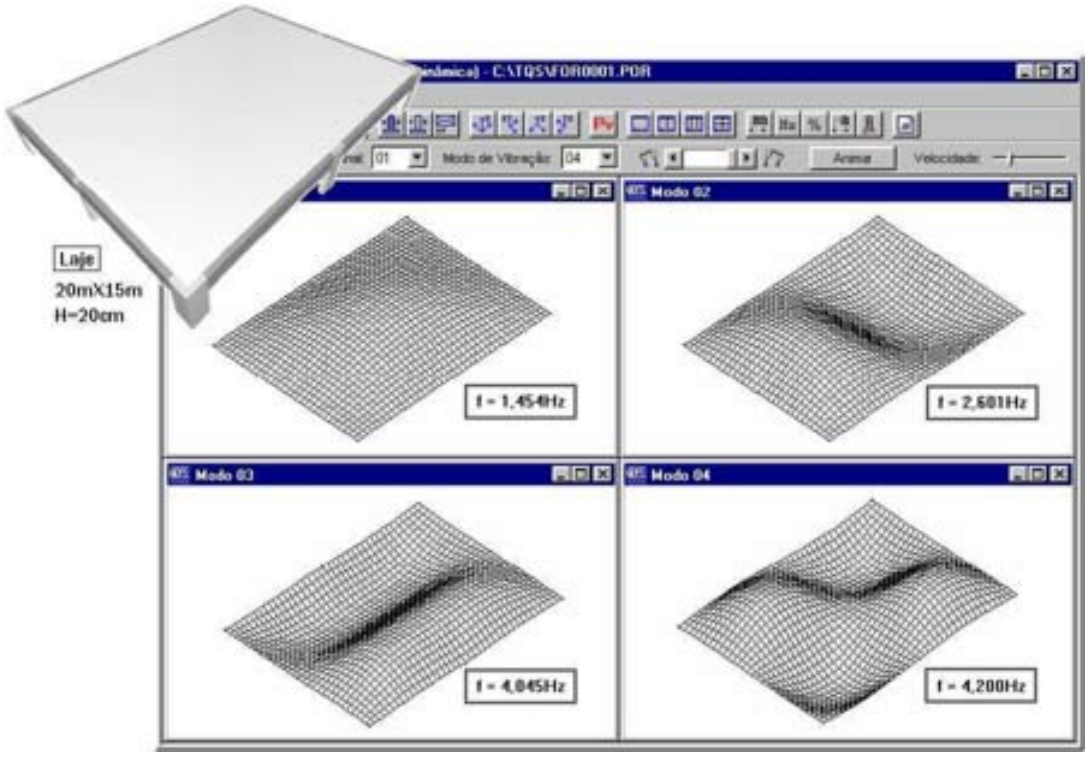
O objetivo deste texto é apresentar o módulo de dinâmica TQS, através de 3 exemplos práticos. O primeiro deles está relacionado à vibração de pisos provocada por movimentação de pessoas. Os dois últimos exemplos estão relacionados à excitação de prédios pela turbulência do vento e a ação do desprendimento de vórtices (turbilhões) em postes altos, respectivamente.

Vibrações em Pisos Provocadas pela Movimentação de Pessoas

A tendência de se projetar pisos com vãos cada vez maiores leva o projetista a ter que considerar os problemas de vibrações causados por excitações rítmicas associadas à movimentação de pessoas.

A NBR 6118 recomenda no seu item 23.3 que: “Para assegurar comportamento satisfatório das estruturas sujeitas a vibrações, deve-se afastar o máximo possível a freqüência própria da estrutura (f) da freqüência crítica (fcrit), que depende da destinação da respectiva edificação.” Para tal, essa norma prescreve que $f > 1,2\ fcrit$, onde os valores de fcrit estão relacionados na sua Tabela 28. Por exemplo, no caso de escritórios deve-se adotar valores de 3Hz a 4Hz para fcrit.

Como exemplo, analisamos uma laje retangular de concreto de 20cm de espessura com vãos de 15m e 20m. Essa laje está apoiada em vigas de borda rígidas, que por sua vez se apóiam em 8 pilares de concreto posicionados nos extremos e no meio dos seus vãos. A laje foi discretizada através de elementos de barras tridimensionais. Os 4 primeiros modos naturais e suas freqüências correspondentes são mostradas na figura a seguir. Observemos que a freqüência fundamental (1.45 Hz) dessa laje seria menor do que o valor mínimo de 3.6Hz recomendado pela NBR 6118 para lajes destinadas a pisos de escritórios.



Ação Dinâmica do Vento em Edifícios

Na análise estrutural, usualmente, admite-se que o fluxo de vento é unidirecional e que sua ação pode ser dividida em 2 parcelas, uma média, o vento médio, e outra de caráter aleatório e flutuante em torno desta média, a turbulência ou rajadas. A ação decorrente do vento médio é tratada como carga estática. Já a intensidade das cargas associadas às rajadas do vento varia ao longo do tempo, podendo gerar efeitos dinâmicos muito maiores do que aqueles decorrentes da sua aplicação gradual.

A resposta dinâmica de uma edificação a ação do vento dependerá tanto das características do vento incidente como das características dinâmicas da estrutura, isto é, suas freqüências naturais e o seu amortecimento.

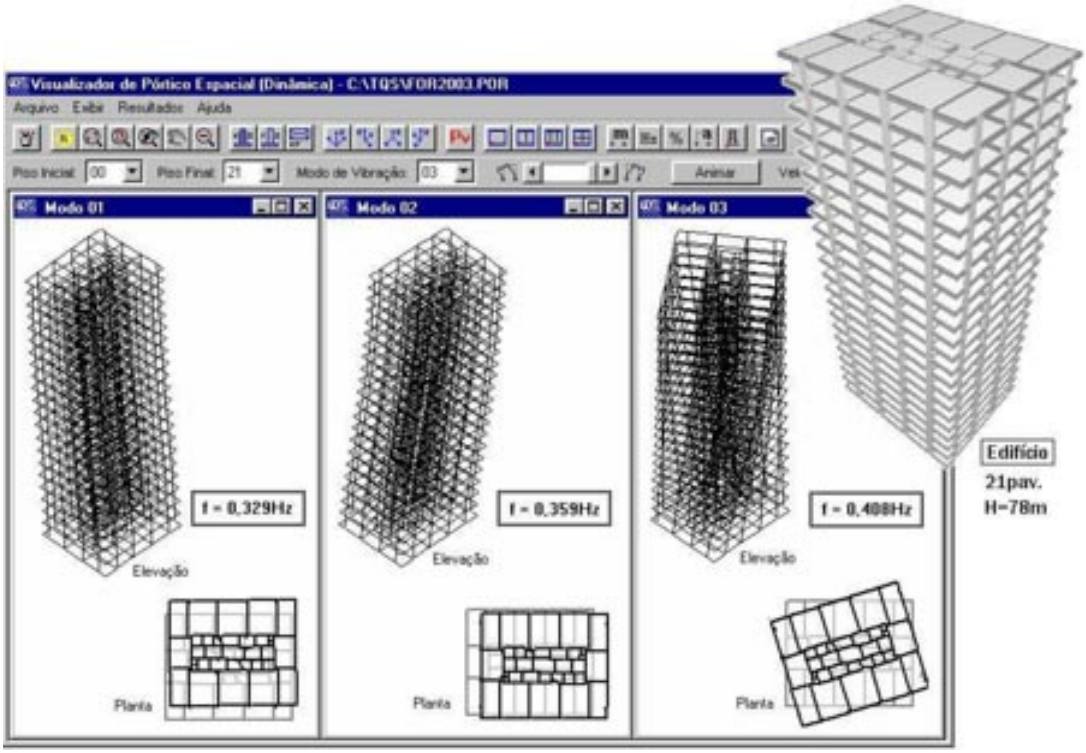
De um modo geral, a turbulência do vento corresponde a uma ação dinâmica cujas componentes espectrais preponderantes estão na faixa das baixas freqüências, tendendo a excitar principalmente os primeiros modos de vibração da estrutura na qual ele incide. Conseqüentemente, a incidência de um vento sobre um edifício poderá provocar efeitos dinâmicos significativos, se o espectro de potência de sua turbulência apresentar valores elevados de energia cinética na faixa da freqüência fundamental da estrutura do edifício.

Com relação a esse ponto, a NBR 6123 “Forças devido ao vento em edificações” (1988) prescreve, de uma forma genérica, no seu Capítulo 9, que “...edificações com período fundamental superior a 1s, em particular aquelas fracamente amortecidas, podem apresentar importante resposta flutuante na direção do vento médio.”

A mesma norma, em seu anexo H, indica como se deve proceder nos casos em que a ação dinâmica do vento na estrutura é relevante: “Certas edificações esbeltas e flexíveis apresentam comportamento intrinsecamente dinâmico quando expostas ao vento, sendo que nem sempre a velocidade mais desfavorável é a velocidade máxima prevista para o vento. Torna-se necessário estudar sua estabilidade, por via matemática e/ou experimental, em uma gama intensa de velocidades do vento”. Em outras palavras, a norma indica a necessidade de realização de uma análise dinâmica onde as flutuações da velocidade do vento incidente na edificação devem ser tratadas como aleatórias. Um exemplo de análise numérica (matemática), onde a turbulência do vento é considerada como uma carga dinâmica aleatória obtida a partir de seu espectro de densidade de potência, é o “vento sintético”, proposta pelo Prof. Dr. Mário Franco, em 1993. A outra possibilidade sugerida pela norma seria a realização de ensaio experimental em túnel de vento, onde o prédio e sua vizinhança são reproduzidos em modelo reduzido.

Como exemplo de aplicação do módulo dinâmico da TQS, analisamos um edifício de concreto com 21 pavimentos. Os seus 3 primeiros modos naturais e suas freqüências correspondentes são mostradas na figura a seguir. Observemos

que a freqüência fundamental (0.329 Hz) da estrutura desse edifício seria menor que o valor de 1Hz recomendado pela NBR 6123 para dispensa da consideração da ação dinâmica do vento.



Desprendimento de Vórtices

Torres e edifícios altos podem apresentar oscilações no plano perpendicular à direção do vento. Em alguns casos, essas oscilações transversais podem atingir tal magnitude que tornam-se preponderantes no projeto da estrutura. Existem várias causas para essas oscilações laterais como, por exemplo, a assimetria da estrutura. No entanto, em edificações cilíndricas ou quase cilíndricas, as forças transversais periódicas devidas ao desprendimento de vórtices podem ser as mais importantes. Isto se dará em situações onde a velocidade do vento alcança um valor que induz o desprendimento de um par destes vórtices numa freqüência próxima a uma das freqüências naturais da estrutura. Os efeitos desse fenômeno na estrutura serão tanto maiores quanto menores a turbulência do vento e o amortecimento estrutural. A ocorrência dessa situação deve ser evitada para a faixa de velocidade esperada para o vento de projeto.

A norma brasileira NBR 6123 “Forças devido ao vento em edificações” (1988) trata desse assunto no item H-1 do anexo H.

Como exemplo, verifiquemos o caso de desprendimentos de vórtices num poste de concreto com 50m de altura, de seção circular vazada com raios interno e externo de 40cm e 50cm, respectivamente. Postes deste tipo são geralmente usados como torre para abrigar equipamentos de telefonia celular. Obtém-se os seguintes valores para as suas 5 primeiras freqüências naturais desta estrutura.

Modo	Período (s)	Frequência (Hz)
01	3.964	0.252
02	0.633	1.580
03	0.226	4.421
04	0.115	8.658

05	0.070	14.303

A fórmula para se calcular a frequência de desprendimento de vórtices para um edifício ou torre com seção cilíndrica circular é a seguinte:

f = (V x S) / D

onde : f = freqüência de desprendimento dos vórtices;

V = velocidade média do vento no topo da torre;

S » 0.2 (número adimensional de Strouhal);

D = 1m (diâmetro da torre).

Usando essa fórmula, obtêm-se os seguintes valores para as velocidades críticas do vento correspondentes as 5 primeiras freqüências do poste:

V_1 = 2,26 m/s;

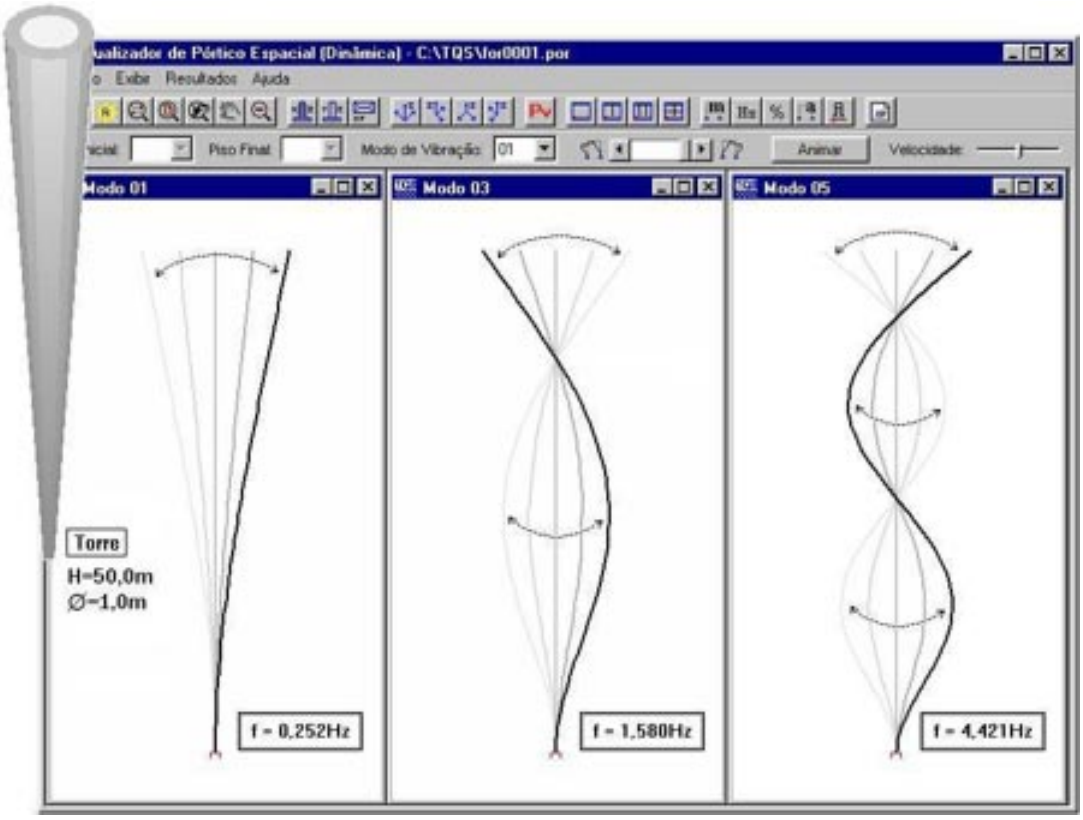
V_2 = 7,90 m/s;

V_3 = 22,11 m/s;

V_4 = 43,29 m/s;

V_5 = 71,52 m/s.

Observemos que estes valores são relativamente pequenos, podendo estar abaixo daqueles adotados no projeto dessas torres como vento máximo ou, até mesmo, como vento operacional. Em tais situações, se o vento soprar durante algum tempo com uma velocidade média próxima a uma dessas velocidades críticas, as oscilações impostas ao poste pelo desprendimento de vórtices podem provocar mal funcionamento dos equipamentos nele instalados.



Dr. Eng. Sérgio Pinheiro Medeiros