Dados Modais Simplificados

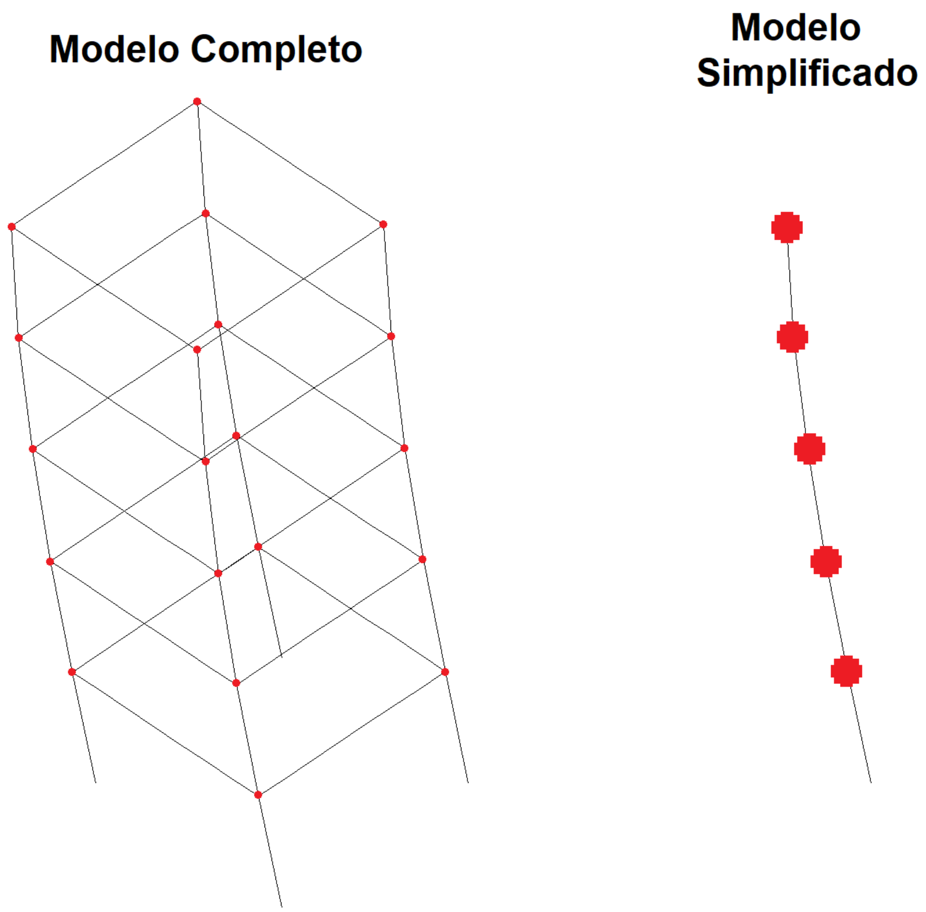
Dados Modais Simplificados

A análise modal efetuada pelo TQS considera que, de modo geral, todos os nós da estrutura possuem algum valor de massa. Esta massa é calculada em função dos carregamentos atuantes nas barras que chegam nestes nós e diretamente nos nós.

Assim, após a análise estrutural e modal, o número de nós e graus de liberdades existentes é grande e pode levar a uma pós-análise demorada ou mesmo impossível.

No caso de túneis de vento, é comum que estes trabalhem com modelos simplificados para a análise dos modos de vibração de edifícios altos para facilitar as análises e entendimento global dos efeitos atuantes na estrutura. Apesar de simplificado, este modelo é totalmente adequado para as análises.

O modelo simplificado utilizado é tal que, para cada pavimento, toda a massa do pavimento é concentrada em apenas um nó e existem apenas 3 graus de liberdades: translação em X, translação em Y e rotação em torno de Z. De modo visual, teríamos o seguinte:



Definição das massas e centro de massa (CM)

Para cada pavimento, a massa utilizada para os graus de liberdade associados as translações são obtidas diretamente da somatória das massas associadas a cada um dos nós:

$$M = \sum m_i$$

O centro de massas (CM), onde haverá o único nó do pavimento, é obtido como a média ponderada das coordenadas dos nós e da massa de cada nó:

$$CM_x = \frac{\sum x_i \cdot m_i}{M}$$

$$CM_y = \frac{\sum y_i \cdot m_i}{M}$$

Por fim, o momento de inércia de massa em relação ao eixo Z (I) é obtido por:

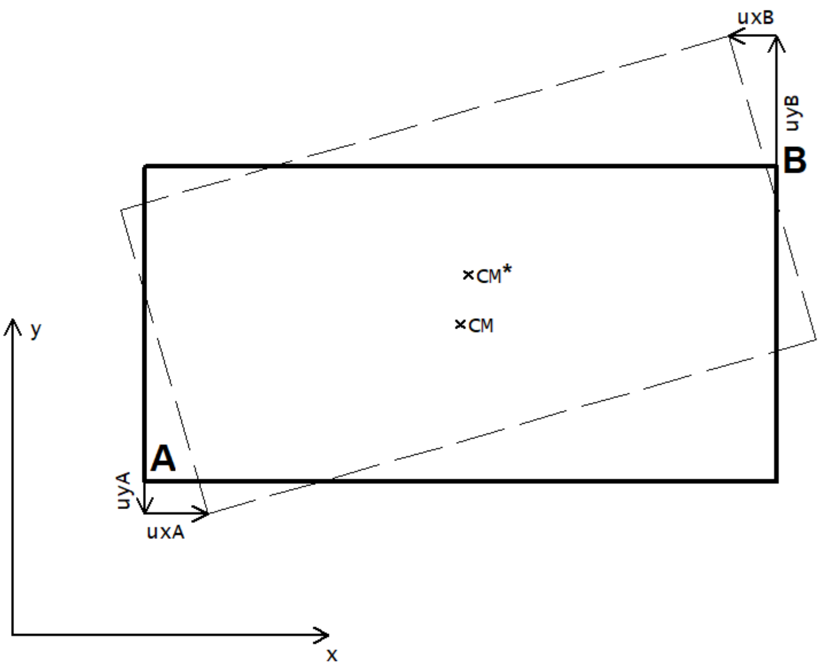
$$I = \sum m_i \cdot r_i{}^2$$

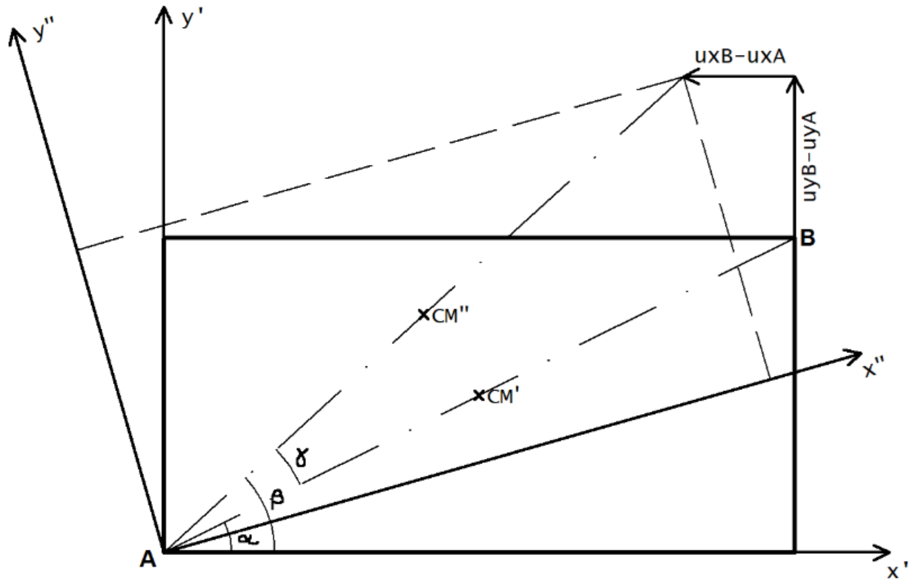
$$r_i = \sqrt{(x_i - CM_x)^2 + (y_i - CM_y)^2}$$

Definição das formas modais

A conversão das formas modais do modelo completo para o modelo do pavimento é feita, primeiramente, isolando os nós de cada pavimento.

Posteriormente, considerando que o pavimento é um diafragma rígido, e se desloca, no plano do próprio pavimento, como um corpo rígido, temos o seguinte:





$$tg(\alpha) = \frac{(y_B - y_A)}{(x_B - x_A)}$$

$$tg(\beta) = \frac{(y_B - y_A) + (u_{yB} - u_{yA})}{(x_B - x_A) + (u_{xB} - u_{xA})}$$

$$\gamma = arctg(\beta) - arctg(\alpha) = arctg\left[\frac{(y_B - y_A) + (u_{yB} - u_{yA})}{(x_B - x_A) + (u_{xB} - u_{xA})}\right] - arctg\left[\frac{(y_B - y_A)}{(x_B - x_A)}\right]$$

$$CM''_x = CM'_x \cdot cos(\gamma) - CM'_y \cdot sin(\gamma)$$

$$CM''_y = CM'_x \cdot sin(\gamma) + CM'_y \cdot cos(\gamma)$$

$$CM^*_x = CM''_x + x_A$$

$$CM^*_y = CM''_y + y_A$$

$$u_{CMx} = CM''_x - CM_x$$

$$u_{CMy} = CM''_y - CM_y$$

Os valores u_{CMx}, u_{CMy} e γ representam os “deslocamentos” e rotação do centro de massa da forma modal. A definição destes valores é feita para cada uma das formas modais calculadas do modelo estrutural.

A seleção dos pontos A e B é feita para cada pavimento de modo que o ponto A represente o nó do modelo estrutural mais à esquerda/abaixo (quadrante 3) e o ponto B represente o nó do modelo estrutural mais à direita/acima (quadrante 1).

Verificação de ortogonalidade

Após a obtenção das formas modais e massas do modelo simplificado, é feita a verificação de ortogonalidade destes dados.

A priori, os modos de vibração do modelo completo são ortogonais, de modo que:

$$\varphi^T \cdot M \cdot \varphi = D$$

Onde:

D : é uma matriz ortogonal;

φ : é a matriz com modos de vibração originais;

φ^T : é a transposta de φ;

M : é a matriz de massa que pode é aproximada por uma matriz diagonal onde cada elemento $i = j$ corresponde à massa de cada grau de liberdade.

Tomando apenas um modo de vibração teríamos:

$$\varphi_i^T \cdot M \cdot \varphi_j = 0 \; para \; i \neq j$$

Como cada modo de vibração é um autovetor, podemos afirmar que: se φ_j é um modo de vibração, $\alpha \cdot \varphi_j$ também é um modo de vibração (é um número qualquer). Ou seja, podemos multiplicar φ_j por um número qualquer tal que:

$$\varphi_i^T \cdot M \cdot \varphi_j = \delta_{ij}$$

$$\delta_{ij} = 1 \; para \; i = j$$

$$\delta_{ij} = 0 \; para \; i \neq j$$

Neste caso, diz-se que os modos estão normalizados.

Quando a redução do modelo completo para o modelo simplificado (sub-índice p) é feita, estamos buscando um conjunto M_p e φ_p que seja representativo.

Se os modos de vibração originais estavam normalizados, e o conjunto M_p e φ_p é realmente representativo, então temos:

$$\varphi_{pi}^T \cdot M_p \cdot \varphi_{pj} \sim \delta_{ij}$$

$$\delta_{ij} = 1 \; para \; i = j$$

$$\delta_{ij} = 0 \; para \; i \neq j$$

Esta aproximação costuma ser adequada para a maioria dos casos, tendo alguma falha em estruturas onde algum dos modos de vibração não está diretamente ligado a torre “como um todo”.

No caso de um dos modos de vibração da estrutura simplificada não ser ortogonal, o arquivo de saída indicará isso.

Geração dos arquivos

A geração dos arquivos com os dados modais simplificados é feita através do Visualizador de Análise Dinâmica, existente dentro do sistema Pórtico-TQS. Dentro do Visualizador de Análise Dinâmica, execute: "Vento" - "Exportar" - "Modelo Simplificado".

Após o processamento serão gerados 4 arquivos dentro da pasta "Espacial" do edifício. São eles:

Modal_General_Data.LST
Dados gerais do edifício e nível dos pavimentos;
Modal_Mass_Distribution.LST
Massa, centro de massa, momento de inércia da massa para cada pavimento;
Modal_Mode_Shapes.LST
Período, frequência e forma modal de cada modo de vibração;
Modal_Orthogonality.LST
Relatório de verificação de ortogonalidade
Como a maioria dos túneis de vento se encontra fora do Brasil, estes relatórios foram desenvolvidos na língua inglesa, de modo a ter melhor entendimento pela equipe do túnel.

Verificação mínima

O engenheiro estrutural responsável pelo projeto deve fazer a verificação da ortogonalidade dos modos simplificados, para ter certeza que o conjunto simplificado é representativo do conjunto original.

Para isso, é necessário acessar o relatório "Modal_Orthogonality.LST". Neste relatório é apresentada uma matriz. Todos os elementos da diagonal desta matriz devem ser próximos do valor 1.00. Todos os demais valores devem ser próximos do valor 0.00.