

239492

## Método aproximado para análise estática de edifícios altos

Mauro Lacerda Santos Filho ★  
Vivian Baeta Lacerda Santos ★★

### RESUMO

A análise estrutural de edifícios altos, quando sujeitos a esforços transversais torna-se muito complexa quando a estrutura apresenta alto grau de assimetria e sua geometria é complicada. A aplicação de métodos computacionais torna-se cara e inviabiliza o projeto, ao mesmo tempo que métodos simplificados mascaram o verdadeiro comportamento da estrutura. Um novo modelo considerando uma solução fechada para o problema da análise tridimensional é apresentado neste artigo. O modelo é de simples utilização e sua aplicabilidade é geral. Um exemplo mostrando a eficácia do modelo é apresentado.

### ABSTRACT

The structural analysis of Tall Buildings subjected to transverse loads becomes a very complex problem when the structure presents an asymmetric shape or the building geometry is irregular. The application of computational packages based on the well-known method of Finite Element and others is normally very expensive and it is not always available for the structural engineer. A simplified model is presented in this paper, introducing a closed-form solution for the three-dimensional analysis of a framework, which is subjected to lateral loads. The example shows the good accuracy of the procedure.

(★) Mauro Lacerda Santos Filho, Ph.D em Engenharia Civil pela Colorado State University. Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná e da Universidade Federal do Paraná.

(★★) Vivian Baeta Lacerda Santos, M.Sc em Engenharia Civil pela Colorado State University. Assessora Técnica do CREA-PR.

## I. INTRODUÇÃO

A geometria da planta de um edifício, que inclui a locação dos pilares, a distribuição das vigas e lajes, a posição dos poços de elevadores e escadas, e o tipo de paredes e contraventamento usados, é um dos mais importantes aspectos do projeto estrutural.

As decisões de escolha dessas configurações, feitas normalmente num estágio de anteprojeto, influem na economia, performance, aparência e nível de utilização do edifício.

Para edifícios altos sujeitos a cargas transversais de certa monta, os efeitos da esbeltez da estrutura, devido a sua geometria e propriedades do material construtivo, podem causar diversos problemas de projeto.

Devido às necessidades de garantir a total segurança dos usuários e demais limitações de economia e "serviceabilidade", é muito importante que o engenheiro estrutural tenha ferramentas analíticas que permitam a ele prever, de maneira razoável, o comportamento da estrutura, mesmo nessa fase inicial de anteprojeto.

Muitos programas computacionais existem para executar essa tarefa; porém, muitas vezes, a utilização desses programas torna-se impraticável. Esses pacotes são caros e normalmente requerem extensa informação inicial, o que nem sempre é disponível nesta fase de anteprojeto.

Com o intuito de solucionar esta necessidade analítica neste nível preliminar de cálculo, diversos métodos aproximados foram desenvolvidos apresentando níveis diferentes de complexidade. Em (1), uma resenha bastante completa dos principais métodos existentes na literatura é apresentada.

Um dos grandes problemas deste tópico ocorre no caso em que o edifício apresente geometria irregular e seja assimétrico. Nesta situação a rigidez torsional da estrutura apresenta uma contribuição bastante palpável à rigidez total da edificação, não devendo, portanto, ser negligenciada.

Os autores deste artigo introduzem um novo e original método aproximado, baseado no modelo de discretização do contínuo (discrete continuum method). Este método considera vários tipos de interação entre pilares e "shear-walls", incluindo a rigidez das barras que interligam esses elementos verticais.

Baseado em uma condição de compatibilidade, esta análise linear-elástica permite ao engenheiro estrutural fazer uma avaliação tridimensional de-generada a partir de um problema plano.

Uma solução analítica é proposta para este modelo matemático e um exemplo é mostrado.

## II. MÉTODO PROPOSTO

Diversos autores propuseram a aplicação do método da discretização do contínuo como base para a apresentação da solução aproximada do comportamento estrutural de edifícios altos. Os trabalhos apresentados em (3), (4) e (5) podem ser destacados.

O método aqui apresentado e proposto em (2) estabelece um sistema de equações diferenciais

de segunda ordem, contando com um reduzido número de graus de liberdade.

### II.1 Hipóteses

As hipóteses aplicadas no método proposto incluem:

- I. o piso da edificação age como um diafragma horizontal, sendo absolutamente rígido no seu plano;
- II. os elementos verticais oferecem pequena resistência à torção simples;
- III. as deformações de cisalhamento dos pilares são desprezadas;
- IV. deformações axiais das peças verticais são excluídas dos cálculos;
- V. os materiais são utilizados dentro do regime elástico;
- VI. apenas pequenas deformações são consideradas;
- VII. os efeitos da inércia não são considerados.

### II.2 Formulação Básica

Considerando a ação de cargas transversais apenas sobre o edifício, os esforços normais resultantes nos pilares aparecem devido à ação do cisalhamento agindo na extremidade das peças horizontais.

Em termos de equilíbrio para o pilar  $i$ :

$$N_i(x) = \int_0^x Q_{ij} dx \quad (1)$$

onde  $Q_{ij}(x)$  é a força de cisalhamento na extremidade da peça horizontal que interliga as colunas  $i$  e  $j$ .

Derivando a expressão (1) obtém-se:

$$\frac{dN_i}{dx} = N'_i(x) = Q_{ij}(x) \quad (2)$$

Se mais de um pilar está ligado a coluna  $j$  por elementos horizontais, resulta:

$$N'_i(x) = \sum_{j=1}^n Q_{ij}(x) \quad (3)$$

Assumindo que as cargas laterais trazem o edifício para uma configuração deformada estável, usando uma condição de compatibilidade que envolva os ângulos de rotação dos pilares, é possível escrever-se um conjunto de equações diferenciais em que as incógnitas são cargas axiais em cada coluna, e as forças de cisalhamento definidas para os elementos horizontais.

Em notação matricial, o conjunto de equações toma a seguinte forma:

$$\{N''\} = [A] \{N\} + \{C\} \quad (4)$$

e o problema fica completo considerando as seguintes condições de contorno:

$$\{N(0)\} = \{0\}; \{N'(H)\} = \{0\}.$$

Os elementos das matrizes envolvidas são:

$$A_{ij} = (b_{yi} \cdot Y_i - b_{zi} \cdot Z_i)$$

$$C_i = b_{yzi} T - b_{zi} M_z^0 - b_{yi} M_y^0$$

onde T e M indicam esforços de torção e flexão respectivamente devido a cargas externas, e os elementos b, indicam rigidez de flexão e torção, dependendo do subíndice usado. As coordenadas do pilar em estudo são representadas por y e z.

Aplicando os ditames da teoria de equações diferenciais ordinárias, e considerando o problema como sendo de valores de contorno, pode-se obter uma solução analítica para diversos tipos de carregamento. A solução para o caso de carga lateral uniformemente distribuída é:

$$\{N\} = \{[A]^{-1} [AA_1] \{C\}\} \quad (5)$$

onde:

$$[AA_1] = - \{C\} \sinh(\sqrt{[A]}(H-x))$$

e H é a altura total do prédio.

Em (1) e (2), diversos outros casos de carregamento transversal são estudados e suas soluções sugeridas.

Através de processos de integração numérica, os demais parâmetros que necessitam ser calculados para a total definição do comportamento estrutural da edificação podem ser obtidos. Este processo de obtenção desses parâmetros está devidamente desenvolvido em (1) e (2).

### III. EXEMPLO

Da literatura, um exemplo pode ser extraído para teste do modelo. Esta estrutura foi estudada em (5), em que os autores utilizaram o processo de Bubnov-Galerkin de resíduos ponderados para transformar o sistema de equações diferenciais em um sistema algébrico.

O modelo consiste em um edifício de 12 andares com 2 "shear walls" e 4 pórticos periféricos. A espessura das paredes é de 150mm e as colunas e as vigas tem por dimensões 400mm x 600mm e 200mm x 600mm. A altura de cada andar é 3 metros, e o módulo de elasticidade usado é  $E = 20 \times 10^6 \text{ KN/m}^2$ .

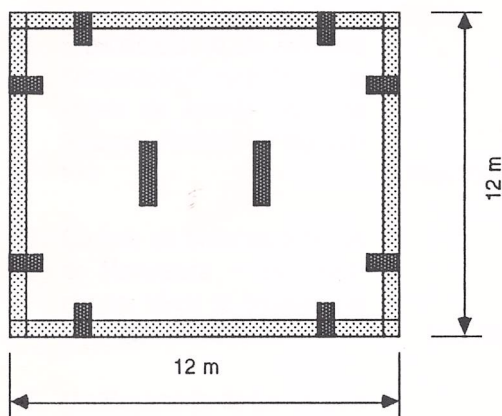


FIG. 1 — Edifício analisado como exemplo.

O caso de carga é a aplicação de uma força de vento de 10 KN por andar, na direção y.

A comparação entre o modelo proposto e os resultados obtidos na literatura mostra uma boa concordância como comprovam as figuras a seguir.

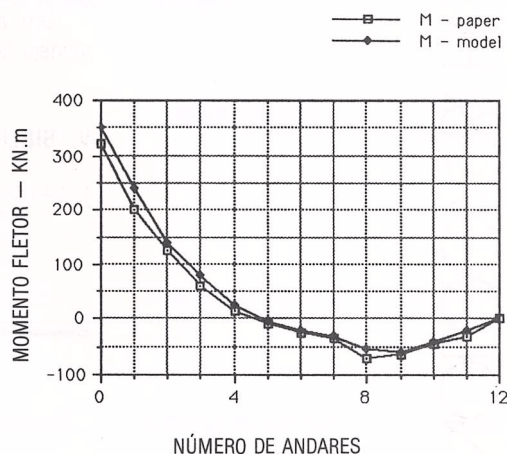


FIG. 2 — Momentos Fletores.

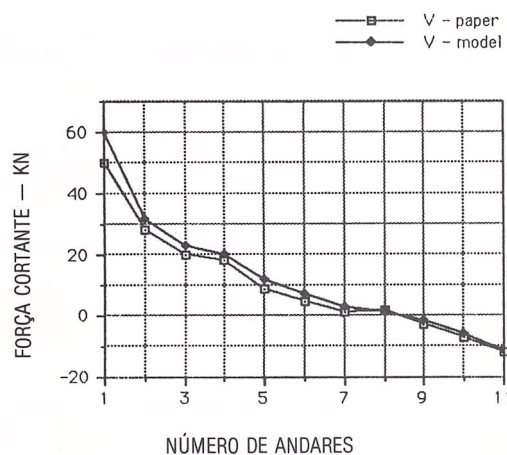


FIG. 3 — Força Cortante.

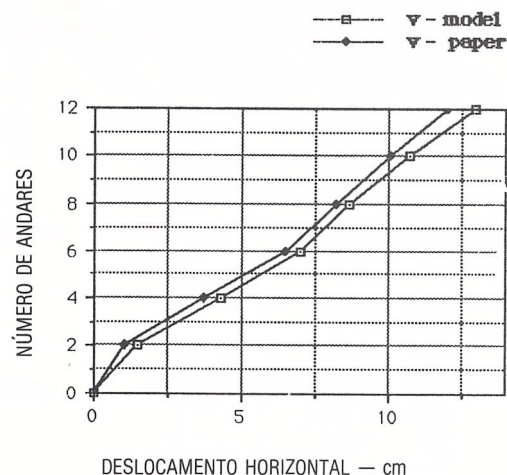


FIG. 4 — Deslocamento horizontal.

#### IV. CONCLUSÃO

Um método aproximado para análise estrutural de edifícios altos com geometria complexa e alto grau de assimetria é apresentado.

Uma solução analítica foi encontrada para o caso particular de carregamento através de cargas uniformemente distribuídas.

Um exemplo é apresentado, comparando o modelo com resultados obtidos na literatura.

#### V. BIBLIOGRAFIA

1. SANTOS FILHO, M.L. (1988). "A closed-form solution for three dimensional structures subjected to lateral loads". A report submitted to the Department of Civil Engineering in partial fulfilment of the requirements for

the degree of Master of Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.

2. SANTOS FILHO, M.L. (1990). "An approximate method for the static, dynamic and stability analysis for tall buildings". A dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, U.S.A.
3. BAIKOV, V.N. (1978). "Reinforced Concrete Structure". Mir Publishers, Moscou, URSS.
4. HALABIEH, B.A. and TSO, W.K. (1990). "Simplified Procedure for Lateral Load Inelastic Analysis of Framed-Tube Structures". Computer and Structures, vol. 34, n.º 1, pp. 113-123, Pergamon Press.
5. SWADDIWEDHIPONG, S.; PIRIYAKOONTORN, S.; LIM, Y-B. and LEE, S-L. (1989). "Analysis of Tall Buildings considering the effects of axial deformations by the Galerkin method". Computer and Structures, vol. 32, n.º 6, pp. 1363-1369, Pergamon Press.