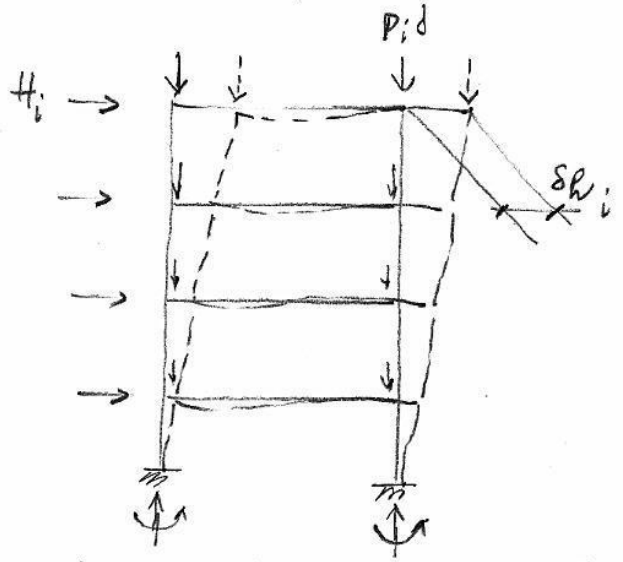
3.4. Esforços Globais de 2ª Ordem

Os esforços globais de 2ª ordem são aqueles gerados pelo deslocamento horizontal dos nós da estrutura, provocados pela ação das cargas verticais e horizontais, ou por inclinações acidentais.

Tais deslocamentos horizontais do ponto de aplicação das cargas verticais dão origem a momentos que devem ser resistidos pela estrutura.



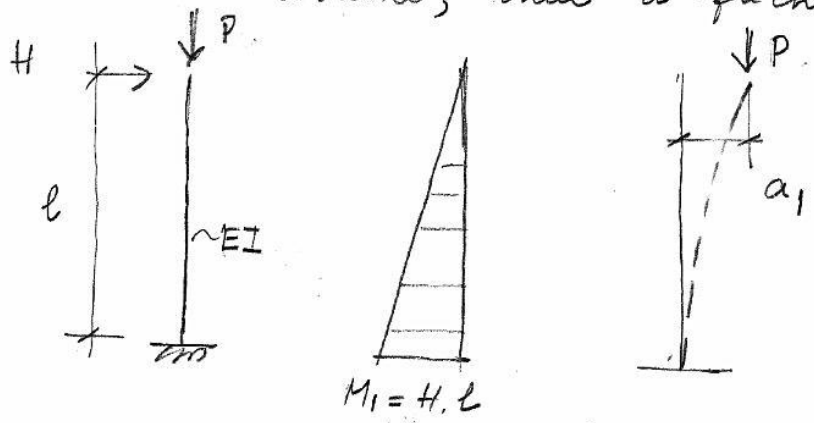
Quanto à consideração dos efeitos de 2ª ordem globais as estruturas são classificadas como de "nós fixos", ou de "nós móveis".

As estruturas de nós fixos são aquelas nos quais os deslocamentos horizontais dos nós são pequenos, gerando portanto efeitos globais de 2ª ordem desprezíveis (inferiores a 10% dos respectivos esforços de 1ª ordem). Neste caso basta considerar apenas os esforços locais de 2ª ordem.

Quando os deslocamentos horizontais dos nós da estrutura não são pequenos, dando origem dessa forma a efeitos globais de 2ª ordem não desprezíveis (superiores a 10% dos respectivos esforços de 1ª ordem), dizemos que a estrutura é de nós móveis. Neste caso devem ser considerados os esforços de 2ª ordem tanto locais, como globais.

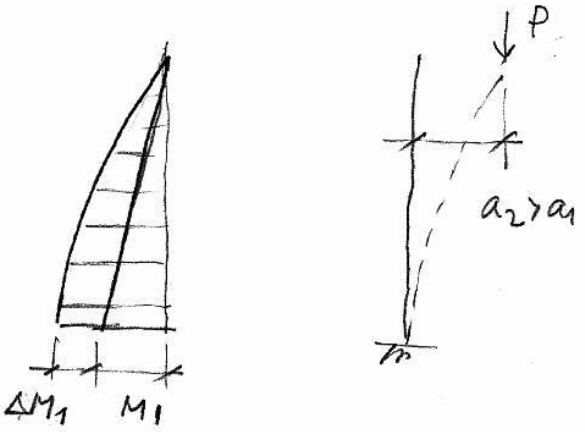
A classificação da estrutura como de nós fixos, ou de nós móveis é feita por processos aproximados como por exemplo o coeficiente γ_I.

Para conceituar o coeficiente γ_z considere-se a barra abaixo, onde a flecha máxima pode

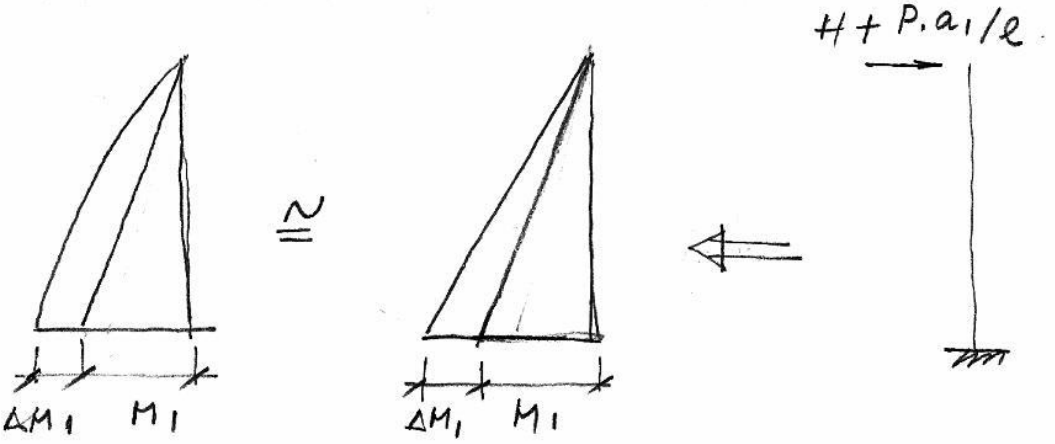


ser estimada, como $a_1 = \frac{H l^3}{3EI} = \frac{M_1 l^2}{3EI}$ a partir da resistência dos materiais.

Na presença de a_1 surge na base o efeito de 2ª ordem dado por $\Delta M_1 = P.\ a_1$ levando a um novo diagrama de momentos e a uma



nova flecha máxima a qual pode ser estimada aproximando-se o diagrama dos efeitos de 2ª ordem por:



Dessa forma podemos escrever:

$$a_1 = \frac{M_1}{k} \quad (1) \qquad \text{onde} \quad \frac{1}{k} = \frac{l^2}{3EI}$$

$$a_2 \cong \frac{1}{k}(M_1 + \Delta M_1) = \frac{M_1}{k} + \frac{P.a_1}{k} = \frac{M_1}{k} + \frac{P}{k}.\frac{M_1}{k}$$

$$a_3 \cong \frac{1}{k}(M_1 + \Delta M_2) = \frac{M_1}{k} + \frac{Pa_2}{k} = \frac{M_1}{k} + \frac{P}{k}\frac{M_1}{k} + \left(\frac{P}{k}\right)^2 \frac{M_1}{k}$$

$$\vdots$$

$$a_n \cong \frac{M_1}{k}\left[1 + \frac{P}{k} + \left(\frac{P}{k}\right)^2 + \cdots\cdots + \left(\frac{P}{k}\right)^{n-1}\right]$$

Para $n \to \infty$, com $\frac{P}{k} < 1$

$$a_f = \frac{M_1}{k}\left(\frac{1}{1 - \frac{P}{k}}\right) = a_1\left(\frac{1}{1 - \frac{P}{k}}\right)$$

Assim é possível determinar a flecha final a partir de a_1.

Pode-se também determinar o momento final como:

$$M_f = M_1 + P.a_f = M_1 + P.a_1\left(\frac{1}{1 - \frac{P}{k}}\right)$$

utilizando-se (1)

$$M_f = M_1 + P.\frac{M_1}{k}\left(\frac{1}{1 - \frac{P}{k}}\right) = M_1\left(1 + \frac{P/k}{1 - P/k}\right)$$

$$\boxed{M_f = M_1\left(\frac{1}{1 - \frac{P}{k}}\right)}$$

Para este exemplo da barra em balanço o resultado aproximado obtido:

$$a_f = a_1 \left(\frac{1}{1 - \frac{P}{\frac{3EI}{\ell^2}}} \right)$$

, mostra-se contra a segurança, quando comparado com a solução mais precisa

$$a_f = a_1 \left(\frac{1}{1 - \frac{P}{\frac{\pi^2 EI}{4\ell^2}}} \right) = a_1 \left(\frac{1}{1 - \frac{P}{2{,}47 \frac{EI}{\ell^2}}} \right)$$

A precisão da solução aproximada será tão melhor quanto maior for a afinidade entre as solicitações decorrentes das forças horizontais, e aquelas decorrentes do efeito de 2ª ordem.

O coeficiente γ_z pode ser identificado como:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{P}{k}}$$

no qual empregando-se (1)

tem-se

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{P.a_1}{M_1}} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_1}{M_1}}$$

onde:

ΔM_1 : É a primeira avaliação dos efeitos de 2ª ordem obtida como $P_1 a_1$

M_1 : É o momento de 1ª ordem na base da estrutura. (Momento de Tombamento)

O coeficiente γ_z definido pela NBR 6118, é uma extensão do conceito apresentado, sendo sua aplicação restrita a estruturas reticuladas com pelo menos quatro andares.

Para a sua aplicação devem ser consideradas as ações com seus valores de cálculo, e a não linearidade física do concreto através da redução da rigidez à flexão EI, conforme recomendação da NBR6118.

Caso resulte $\gamma_z \leq 1,1$ a estrutura é considerada de nós fixos, e os efeitos globais de 2ª ordem podem ser desprezados.

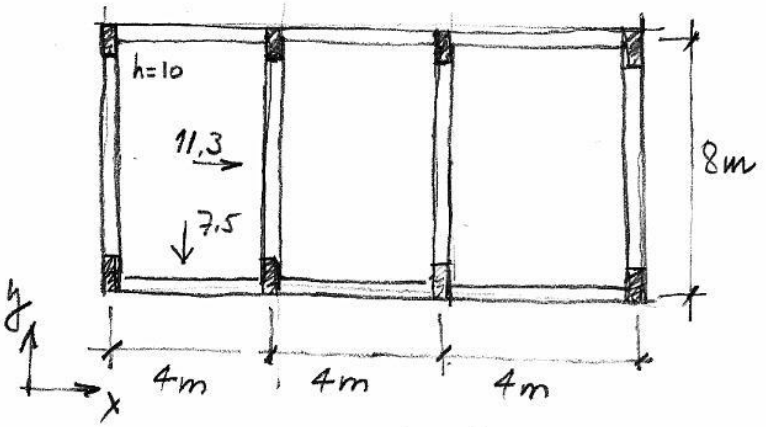
Caso resulte $\gamma_z > 1,1$ a estrutura é considerada de nós móveis.

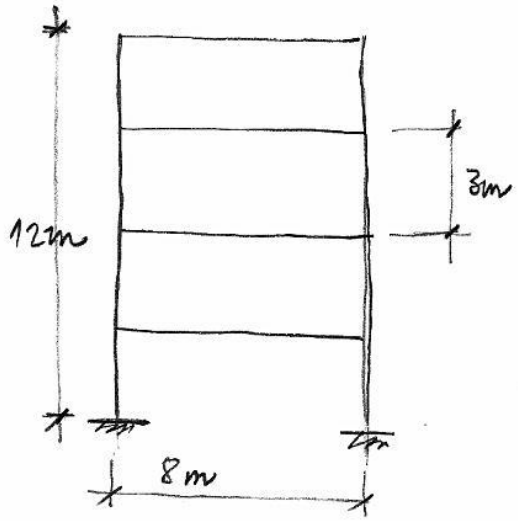
Caso $1,1 < \gamma_z \leq 1,3$ é possível considerar os esforços globais de 2ª ordem ampliando-se os esforços solicitantes, originados pelas ações que deslocam a estrutura horizontalmente, através do fator $0,95\gamma_z$.

Exemplo:

Avaliar os efeitos de 2ª ordem globais para a estrutura, segundo sua menor dimensão em planta (direção y)

Adotar $f_{ck} = 20$ MPa





VIGAS 20x60 (cm²)

PILARES 20x40 (cm²)

Para esta avaliação será tomado como representativo para a estrutura um dos pórticos planos centrais

Lajes: $h = 0{,}10\,m$

$g = 0{,}10 \times 25 = 2{,}5$

S.C = = 2.0

rev = = 1.0

alv. distrib. = 2,0

7,5 kN/m²

Viga Transversal (y)

$g = 0{,}20 \times 0{,}60 \times 25 = 3{,}0$

$L = 2 \times 11{,}3 = 22{,}6$

25,6 kN/m

Viga Longitudinal (x)

$g = 0{,}20 \times 0{,}60 \times 25 = 3.0$

L = = 7,5

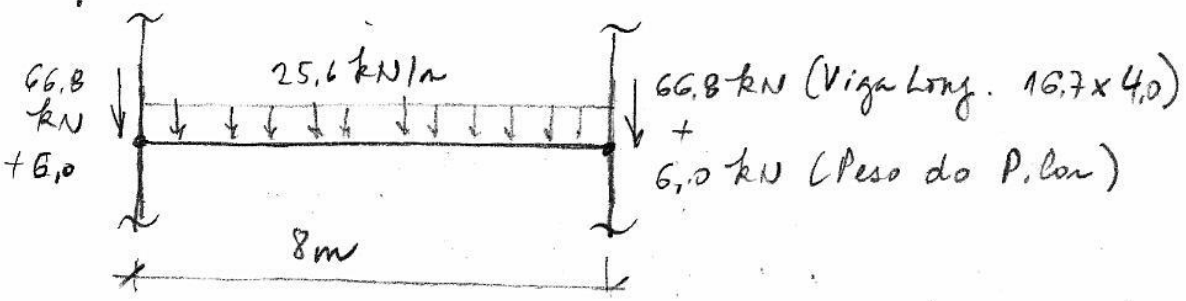
alv = = 6,2

16,7 kN/m

Peso de 1 lance de Pilar

$g_P = 0{,}20 \times 0{,}40 \times 3.0 \times 25{,}0 = 6\,kN$

Cargas Verticais atuantes em um pavimento típico

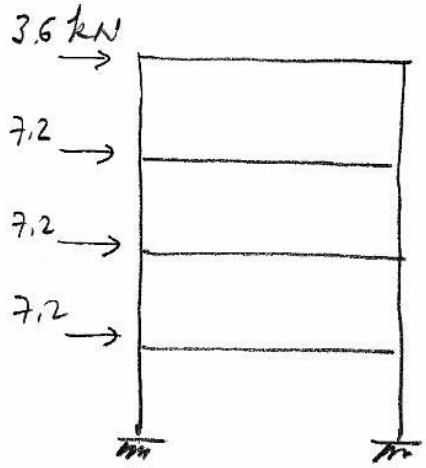


cargas Horizontais devidas ao vento, suposto como uma pressão uniforme atuante sobre a fachada do edifício.

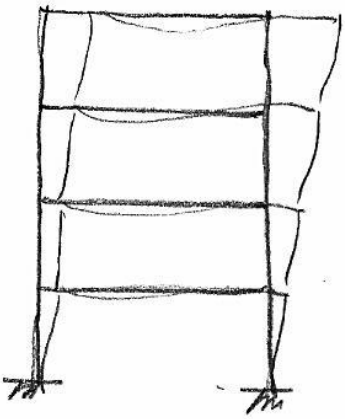
$q_y = 0{,}6\ kN/m^2$

Em cada pavimento temos: $Q_y = q_y \cdot h_{pav.} \cdot larg.\ infl.$

$Q_y = 0{,}6 \times 3{,}0 \times 4{,}0 = 7{,}2\ kN$



Aplicando-se no pórtico as cargas horizontais, e verticais de cálculo ($F_d = F_k \times 1{,}4$) e adotando-se o produto $(E_c I)_{red} = 0{,}7\ E_c I$ para considerar a redução de rigidez devida à fissuração temos os seguintes deslocamentos horizontais:



δ_h (m) (desloc. horiz. do pav.)

0,0109

0,00984

0,00736

0,00352

(Neste caso os deslocamentos horizontais devem-se predominantemente às cargas horizontais.)

Assim podemos determinar o valor de γ_z

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{1,d}}{M_{1,d}}}$$ onde:

$$\Delta M_{1,d} = \left[25.6 \times 8.0 + 2 \times (66.8 + 6.0)\right] \times \overset{\gamma_F}{1.4} \times$$

$$\times (0{,}0109 + 0{,}00984 + 0{,}00736 + 0{,}00352) = 15{,}5 \text{ kNm}$$

(Cargas Verticais de Cálculo de cada pavimento, multiplicadas pelos deslocamentos horizontais de seus pontos de aplicação devidos à ação das Cargas Horizontais de Cálculo)

$$M_{1,d} = 3.6 \times 1.4 \times 12.0 + 7.2 \times 1.4 \times (9.0 + 6.0 + 3.0) = 241.9 \text{ kNm}$$

(Momentos na base da estrutura devidos às ações Horizontais de Cálculo)

$$\therefore \gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{15.5}{241.9}} = 1{,}07 < 1.1$$

Estrutura considerada como de nós fixos. Não há necessidade da consideração dos efeitos globais de 2ª ordem

Para o mesmo edifício, reduzindo-se as dimensões dos pilares para 20x30 (cm²) os deslocamentos horizontais passam a:

	δ_h(m)
4º	0,0179
3º	0,0164
2º	0,0127
1º	0,0066

Dessa forma o novo valor de $\Delta M_{1,d}$ fica:

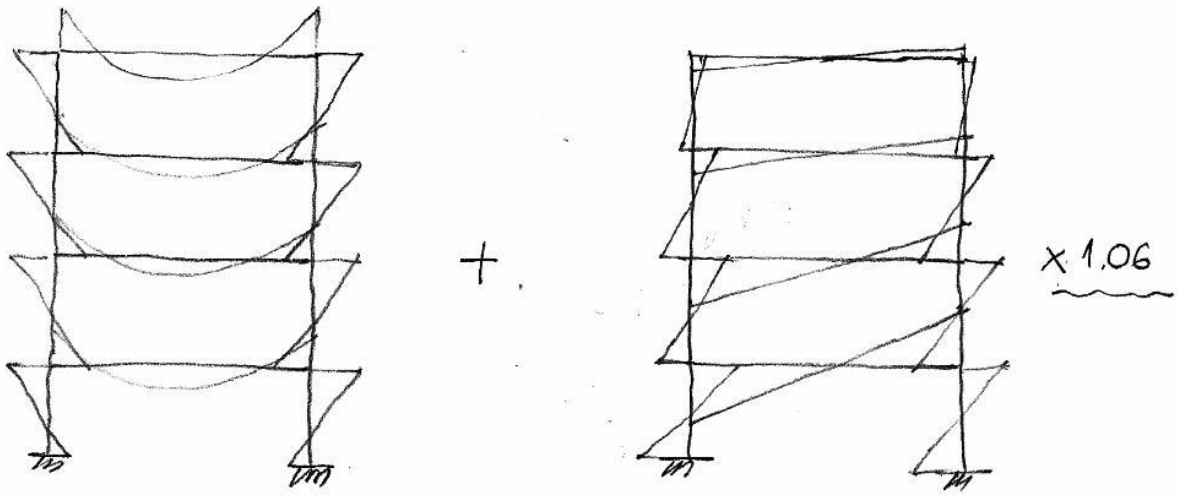
$\Delta M_{1,d} = 26{,}3$ kNm

E o novo γ_z:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{26.3}{241.9}} = 1.12 > 1.1$$

A estrutura agora deve ser considerada como de nós móveis. Uma vez que $1,1 \leq \gamma_z \leq 1.3$ é possível considerar os efeitos de 2ª ordem globais multiplicando-se os esforços solicitantes originados pelas ações que deslocam a estrutura horizontalmente, por $0,95\,\gamma_z$.

Assim em cada elemento devem ser somados os esforços solicitantes devidos às cargas verticais, com aqueles devidos às cargas horizontais multiplicadas por $0,95\,\gamma_z = 0,95 \times 1,12 = 1.06$.

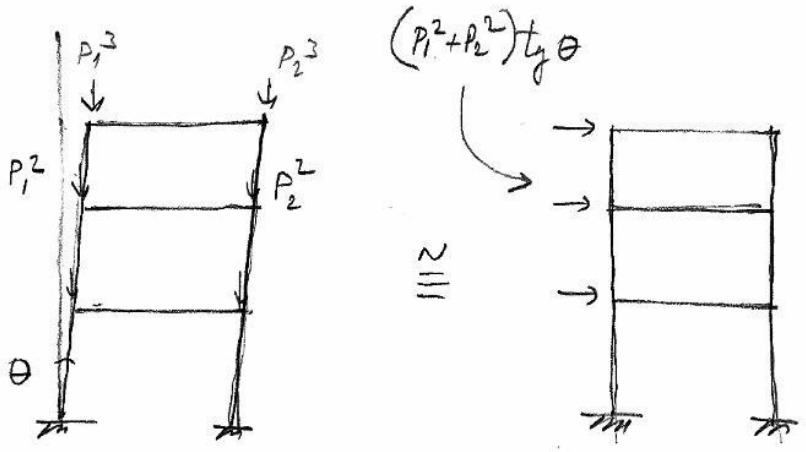


(Md) CARGAS VERTICAIS + (Md) VENTO

OBS.: Quando se consideram inclinação acidental, ou estruturas deslocáveis sob a ação das cargas verticais, ambos os efeitos podem ser transformados em um conjunto de forças horizontais equivalentes para efeito da avaliação dos efeitos globais de 2ª ordem

$$M_{d_{Total}} = M_d\,(\text{Cargas Verticais}) + M_d\,(H_{Vento} + H_{ia} + H_{cv}) \times 0,95\,\gamma_z$$

Inclinação Acidental



Deslocabilidade devida às cargas verticais.