



EDIFÍCIOS DE GRANDE ALTURA

**Aspectos particulares da sua análise
e do seu comportamento**

A. Segadães Tavares

Com a colaboração de:

**João Tavares e Filipe Gonçalves
(STA – Segadães Tavares & Associados)**



Objectivos propostos

- Identificar principais desafios colocados por edifícios de grande altura em termos de concepção e análise estrutural...
- ... partindo de um caso de estudo...
- ... e efectuando uma análise comparativa, a partir da mesma solução estrutural para edifícios com diferentes números de pisos

- **Principais desafios de edifícios de grande altura**
- **Caso de Estudo: Edifícios de 20, 30, 45 e 60 pisos**
- **Análise estrutural comparativa para diferentes números de pisos**

Razão de ser de uma estrutura

- **Objectivo geral:** Cumprir o imperativo do binómio segurança/economia, respeitando a concepção arquitectónica, indo de encontro aos princípios funcionais, estéticos e de conforto dos ocupantes.
- **Função primária:** resistir às acções gravíticas, o peso próprio do edifício e o seu conteúdo. Os respectivos esforços serão aproximadamente proporcionais ao número de pisos e deste modo crescendo de modo quase linear com a altura.
- **Função secundária:** resistir às acções horizontais, como o sismo e vento. Os momentos resultantes aumentarão com, pelo menos, o quadrado da altura, sendo crescentemente penalizantes à medida que o número de pisos aumenta.

NOTA: A importância dos deslocamentos horizontais, resultantes não só das acções horizontais mas também das gravíticas, cresce com altura do edifício

Principais desafios de edifícios de grande altura

- Assegurar a estabilidade necessária às acções gravíticas, sem comprometer solução arquitectónica e controlando os custos da estrutura:
 - Minimizando as dimensões de elementos estruturais, em especial pilares, por razões estéticas e funcionais mas também de rentabilização dos espaços;
 - Reduzir custos das fundações, reduzindo as descargas nestes elementos;
 - Limitar os efeitos dos assentamentos de apoio, quer em termos de verificação da segurança como do controle de deformações em serviço;
- Assegurar uma rigidez horizontal adequada em termos de segurança e conforto:
 - Impedir deslocamentos excessivos devido às acções horizontais;
 - Controlar fenómenos de instabilidade associados a efeitos de 2ª ordem;
 - Impedir vibrações excessivas devido ao sismo e fenómenos de ressonância face ao vento;
- Assegurar uma solução construtiva adequada:
 - Selecionando uma sequência construtiva compatível com meios disponíveis no terreno;
 - Permitindo maior velocidade de construção, em termos de montagem em obra em preparação em estaleiro;
 - Minimizando a exigência de mão de obra especializada;

Agenda

- Principais desafios de edifícios de grande altura
- **Caso de Estudo: Edifícios de 20, 30, 45 e 60 pisos**
- Análise estrutural comparativa para diferentes números de pisos

Solução Estrutural - Considerações Iniciais

- Sem que isso corresponda a uma limitação dos modelos e conclusões, e tendo presente o objectivo da obtenção de uma solução construtiva que se pretende económica, procurou-se recorrer o mais possível aos materiais de construção correntes nos mercados mundiais, e privilegiando técnicas construtivas que correspondam ao natural evoluir das técnicas tradicionais.
- Nos últimos 50 anos generalizou-se o uso do betão armado, dando origem a uma tradição no seu uso, com a abundância de matérias primas de qualidade;
- São inúmeros os exemplos da adopção soluções estruturais em betão armado em edifícios de grande altura, de que é paradigmático o caso das “Torres Petronas” em Kuala Lumpur ou, do ainda em construção, o “Burj Dubai” ultrapassando os 800m.



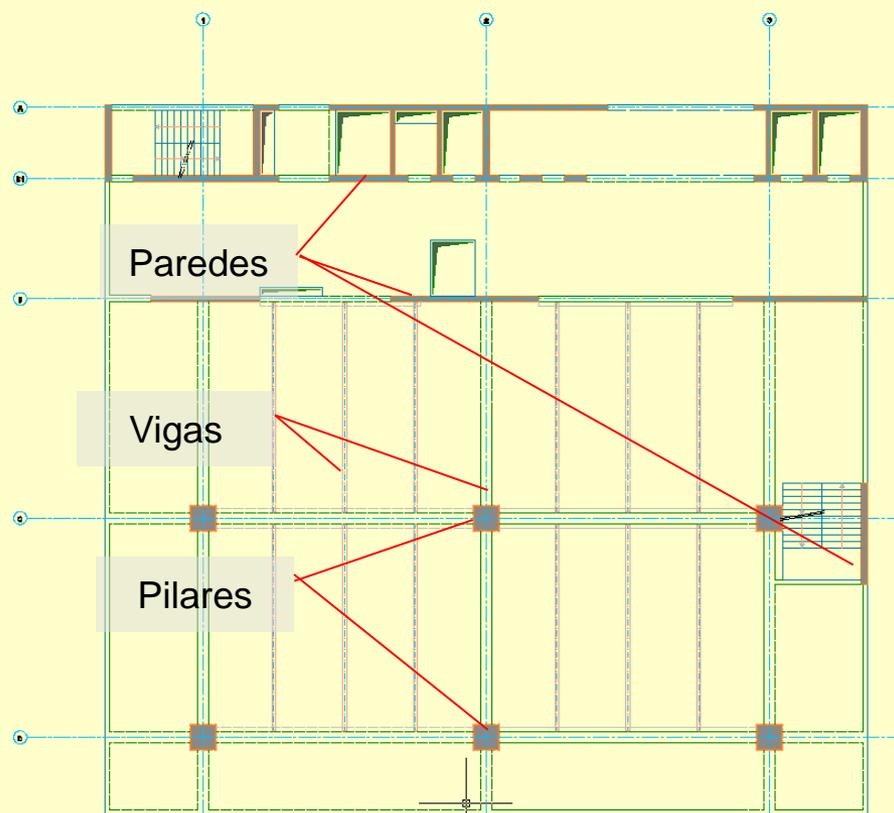
**Petronas
Towers**



**Burj
Dubai**

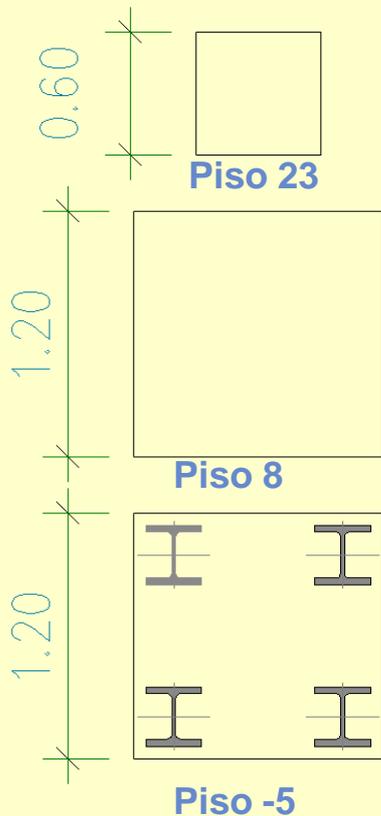
Foi assim privilegiada no estudo a adopção do betão armado como material estrutural (com as características fluência e retracção

Caso de Estudo - Edifício com forte assimetria numa direcção Solução Estrutural – Macro Estrutura



Planta do Piso Tipo

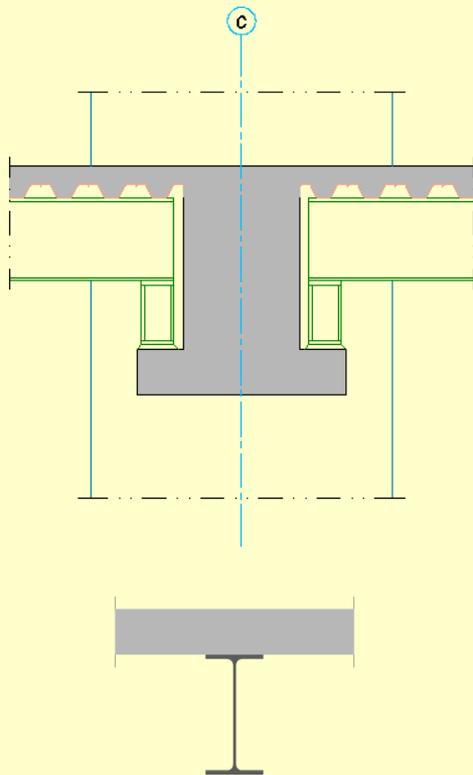
- estabilidade horizontal assegurada por um pórtico tridimensional associado a paredes de corte (“*shear walls*”)
- pórtico tridimensional constituído por:
 - conjunto de 6 pilares dispostos numa malha ortogonal com uma métrica de 10.20x13.00m
 - vigas com 1,00m de altura por 0,50m de largura de alma
 - Paredes, com 30cm, que se desenvolvem junto aos acessos verticais e na separação entre a zona de escritórios e vestíbulo



- elementos de suporte verticais, em particular os pilares, sujeitos a **esforços axiais muito elevados** (>61.000 kN no pilar C/2)
- limitação das suas dimensões, sem redução dos vãos, recomenda utilização de **betões de alta resistência** e a utilização de **secções mistas aço-betão**
- equilíbrio entre controle de qualidade apertado e as limitações existentes no terreno conduz a **C45-55 (B50)**
- podem ser adoptadas **classes de betão, não tão exigentes** do ponto de vista de controle de fabrico e colocação em obra, nos **pisos mais elevados**, em detrimento de uma redução da secção em altura
- dimensões dos pilares, e fundações, fortemente condicionada pela solução estrutural dos **pavimentos e materiais de construção civil**: revestimentos dos pavimentos e fachadas, tectos falsos e paredes divisórias.

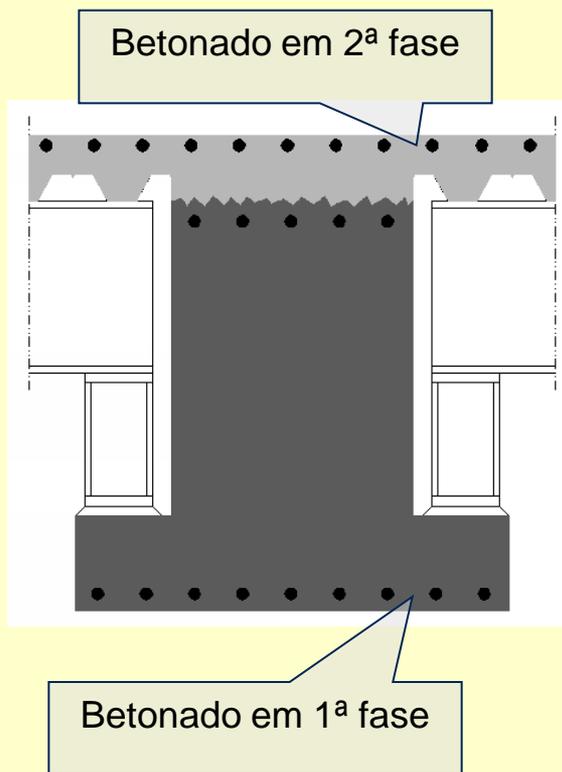
A redução da secção dos pilares, imperativo funcional e arquitectónico, é conseguida pela selecção e combinação dos materiais estruturais e dos materiais e soluções de construção civil e acabamentos .

Caso de Estudo Solução Estrutural – Pavimentos



- limitação do peso dos pavimentos permite reduzir:
 - dimensões dos pilares
 - descargas nos órgãos de fundação
 - altura das vigas da macro-estrutura ($>$ pé-direito)
- controle da deformação rege dimensionamento pavimentos inviabilizando soluções do tipo laje de betão maciça
- foi adoptada uma solução estrutural mista de aço e betão, composta por perfis metálicos laminados dando apoio a lajes de betão com chapa de aço colaborante, pavimentos leves e de baixa deformabilidade

Numa análise preliminar, para uma solução nervurada em betão armado, no edifício de 30 pisos os esforços axiais nos pilares chegam a ser 36% superiores aos da solução mista.



- permite minimizar secções
- permite um bom controle das deformações a longo prazo, por fluência
- permite uma betonagem mais cuidada, evitando betonilhas de regularização
- possibilita rapidez de execução da empreitada, com partes pré-fabricadas:
 - a erecção da macro-estrutura pode ser independente da execução das lajes de pavimentos dos pisos
 - as chapas metálicas colaborantes servem de moldes de cofragem da laje de betão
 - dispensa escoramentos das lajes dos pavimentos

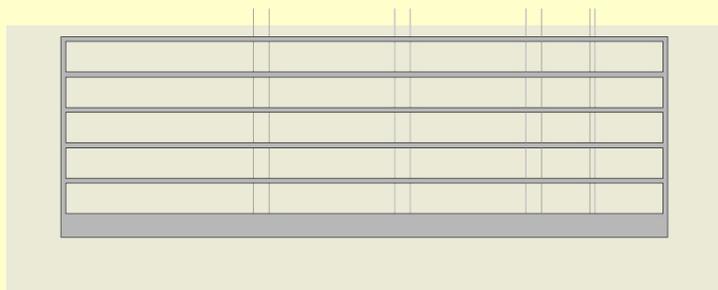
A solução não requer ligações complexas, pois os perfis assentam directamente sobre talões no banzo inferior das vigas de betão

Caso de Estudo

Solução Estrutural – Fundações (Admitida a possibilidade de fundações directas)

- Solução a adoptar (cinco pisos enterrados):
 - ensoleiramento geral (“raft foundation”) constituído por laje em betão armado de 2 metros de espessura (mínimo) assente em argilas consolidadas.
 - A solução considera a interacção solo-estrutura, recorrendo à solução de Boussinesq para determinação das deformações do solo provocadas pela descarga da estrutura no ensoleiramento.
 - São consideradas as situações a curto prazo (condições “não drenadas” e a longo prazo, atendendo à sobre-consolidação das argilas em consequência do aumento das pressões efectivas (“condições drenadas”)
- Sendo possível, a solução em estacas seria mais dispendiosa e poderia colocar importantes problemas logísticos se a área de implantação for reduzida (colocação de equipamentos pesados no fundo da escavação e sua retirada posterior)

Fundação directa: Ensoleiramento Geral



A solução de laje de fundo com 2 metros evita a realização de fundações profundas, sem comprometer o limite de tensões e deformações no solo

Caso de Estudo Metodologia

- **Desenvolvimento de modelo condensado da grelha de piso tipo (condensação estática da matriz de rigidez), criando macro-elementos com as acções condensadas para os nós de continuidade:**
 - Posição e tipo de nós de continuidade (elementos verticais)
 - Propriedades lineares (vigas) e de área (lajes)
 - Pesos próprios, restantes cargas permanentes e sobrecargas
- **Montagem de modelos tridimensionais com os mesmos macro-elementos (sub-estruturas) mas com diferentes número de pisos**
 - 5 pisos enterrados
 - Número de pisos elevados : 10-25-40-55 pisos (Totais de 15-30-45-60 pisos)
 - Acções horizontais em função da altura e número de pisos
- **Comparação de resultados dos diferentes modelos:**
 - Identificação dos efeitos a analisar (desprezáveis em edifícios de pequena altura que ganham importância à medida que número de pisos cresce)
 - Determinação esforços e deslocamentos para cada um dos modelos e acção/efeito
 - Comparações dos efeitos em pontos relevantes

Foram analisados os principais efeitos específicos em edifícios de grande altura para modelos com um número crescente de pisos

Acções Comuns às de Edifícios Correntes

- Peso próprio da estrutura
- Restantes cargas permanentes:
 - Revestimentos
 - Paredes divisórias
 - Coberturas
 - Estruturas secundárias e equipamentos
 - Fachadas
- Sobrecargas de Utilização
- Variação da temperatura e Retracção em Planta (lajes de grande extensão)
- Vento (E.L.Últimos)
- Sismos

Acções Específicas de Edifícios de Grande Altura ⁽¹⁾

- Faseamento construtivo
- Variação da Temperatura e Retracção em altura (em pilares e paredes)
- Fluência
- Efeitos de 2ª ordem
 - Imperfeições geométricas
 - Efeito $P\Delta$
- Assentamentos de apoio
 - Também pode ser importante em estruturas correntes
 - Relevância cresce com aumento das cargas nas fundações e altura do edifício
- Vento (E.L. Utilização - conforto)

1. As acções indicadas como específicas para edifícios de grande altura também actuam nos edifícios correntes, mas os seus efeitos têm pequena relevância.

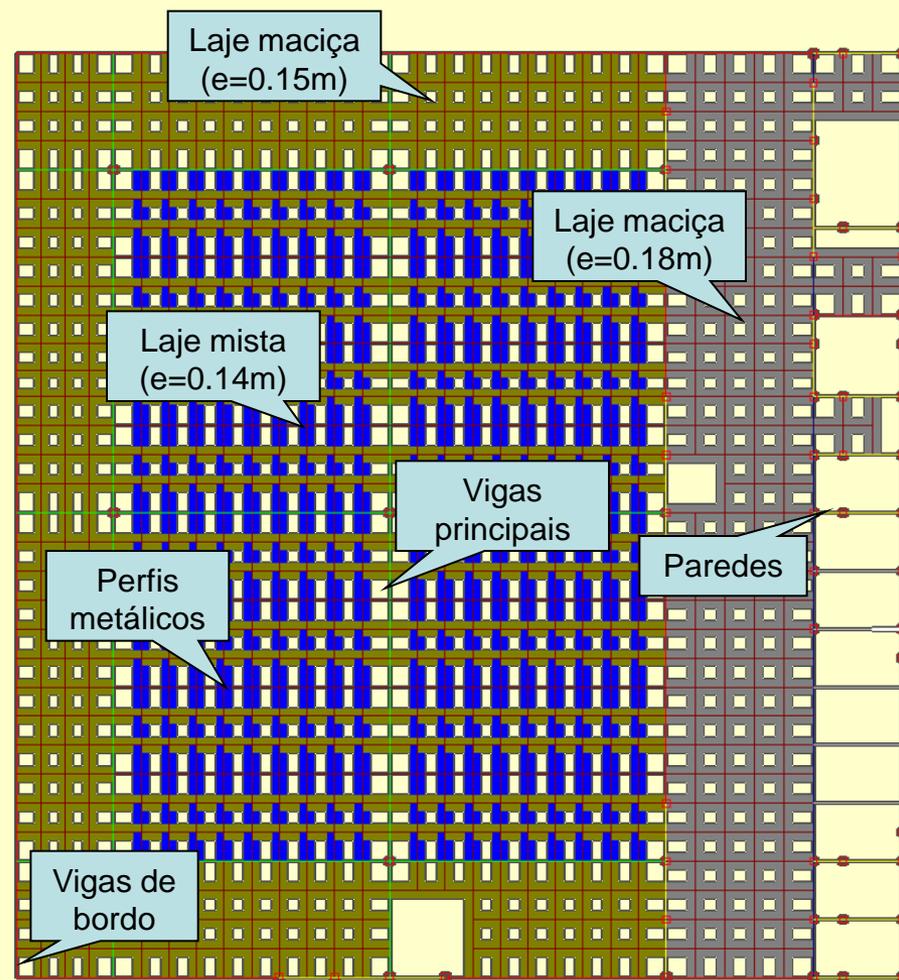
ALERTA:

Uma análise estrutural como a utilizada para edifícios correntes pode subestimar largamente os esforços em edifícios de grande altura.

Caso de Estudo

Modelo de análise da estrutura dos pisos (simplificado)

- Foi gerada uma malha que serviu para caracterizar a discretização das lajes simulando cada um dos pisos do edifício.
- Foram introduzidas em cada elemento da laje as acções verticais consideradas.
- Cada nó da laje tem apenas 3 graus de liberdade - δx , δy e θz (funcionando a laje como diafragma rígido).

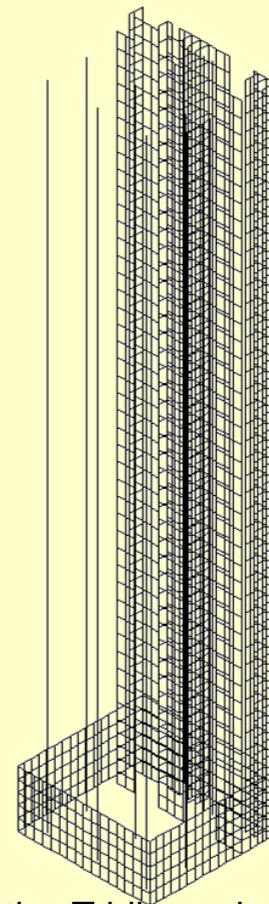


As grelhas do caso de estudo foram simplificadas de modo a obter uma malha mais regular e assim facilitar a comparação entre modelos

Caso de Estudo

Modelos tridimensionais

- O pórtico tridimensional é gerado a partir dos macro-elementos (sub-estruturas) obtidos por condensação estática da matriz de rigidez de cada piso relativamente aos nós de continuidade em que a laje se liga aos pilares e paredes de apoio combinados com elementos verticais lineares (pilares) ou bidimensionais (paredes).
- Cada nó do pórtico tridimensional tem 3 ou 6 graus de liberdade, 3 no caso de existir ligação a uma grelha (θ_x , θ_y e δ_z) e 6 em caso contrário.
- Os 3 graus de liberdade de cada grelha (δ_x , δ_y e θ_z), simulam o funcionamento dos pisos como diafragmas rígidos



Pórtico Tridimensional
Elementos Verticais

O número de caves foi mantido, variando-se apenas o número de pisos acima do solo

Caso de Estudo Modelo de Análise das Fundações

Deslocamentos verticais num meio semi-indefinido por acção de uma força Q

Formulação de Boussinesq

- Distribuição de Pressões

$$p = \frac{3Q}{2\pi Z^2} \cos^5 \alpha$$

- Campo de Deslocamentos

$$(w)_{Z=0} = \frac{Q(1-\nu^2)}{\pi \cdot E \cdot r} \quad (\text{Singularidade para } r=0)$$

- Deslocamento sob carga uniforme circular

$$(w)_{max} = \frac{2(1-\nu^2) \cdot q \cdot a}{E}$$

(Deslocamento máximo no centro de um círculo de raio a em que actua uma carga uniforme de densidade q)

Usando a solução de Boussinesq, ou as soluções de Poulos & Davies, discretizações em elementos finitos, etc., é possível determinar a matriz de flexibilidade do solo $[F]_{\text{solo}}$ e, por inversão, a correspondente matriz de rigidez $[K]_{\text{solo}}$

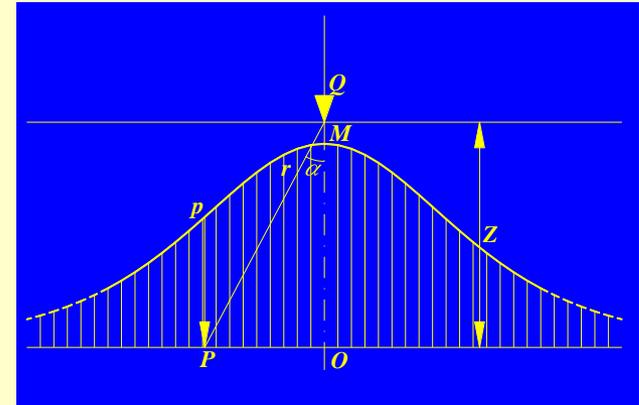
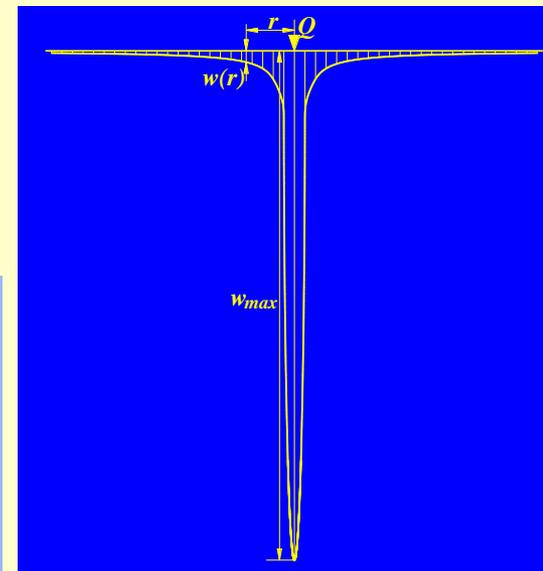
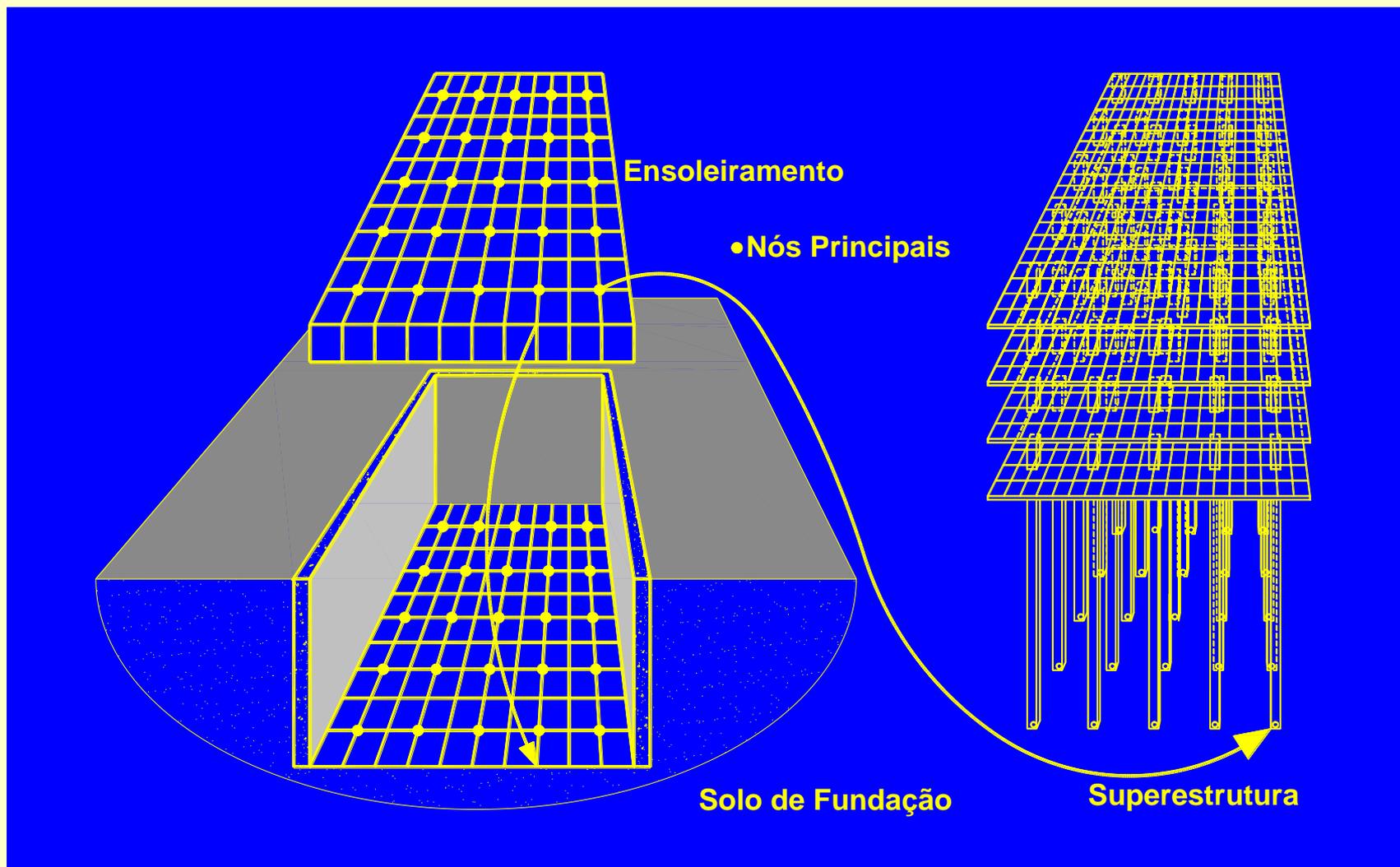


Diagrama linear de pressões
à profundidade Z

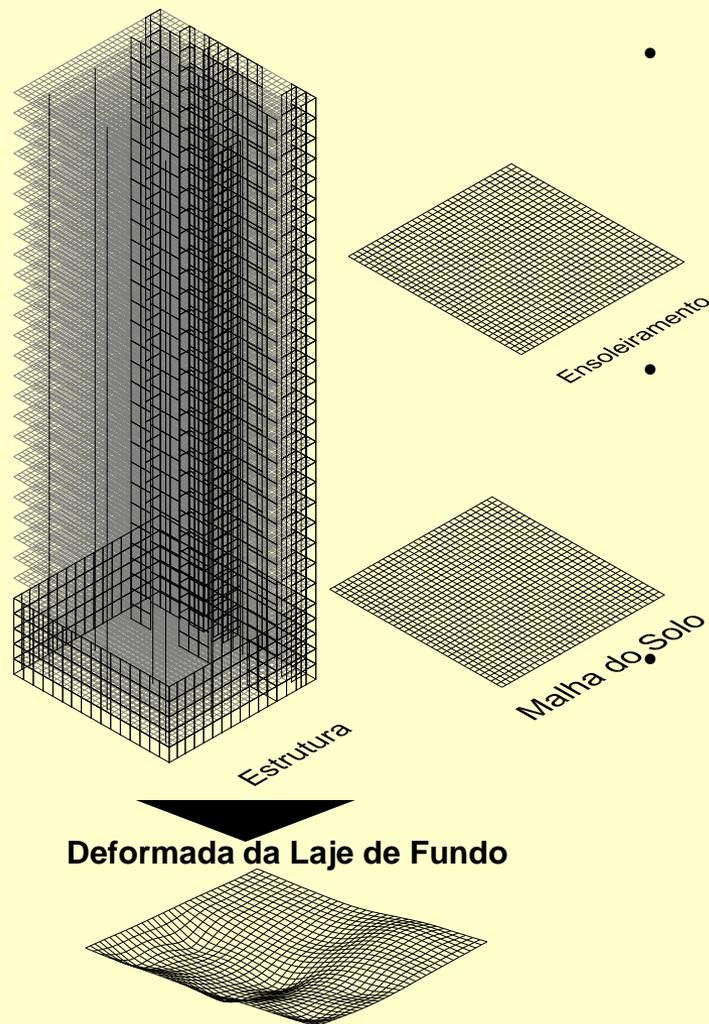


Curva de deslocamentos

- Formação da Matriz de Rigidez do Conjunto



Assentamentos de Apoio – Modelação Estrutural



- Os deslocamentos verticais na estrutura são compatibilizados pela:
 - Rigidez do solo
 - Rigidez da laje de fundo
 - Rigidez do Edifício (relativa aos nós de ligação ao ensoleiramento)

• O deslocamentos finais na fundação são calculados:

- $[K]_{TOTAL} = [K]_{SOLO} + [K]_{FUNDAÇÃO} + [K]_{ESTRUTURA}$
- $[F]_{TOTAL} = [K]^{-1}_{TOTAL}$
- $\{\text{Deslocamentos}\} = [F]_{TOTAL} \times \{\text{Reacções}\}$

Impondo os deslocamentos assim calculados nos nós de ligação do modelo tridimensional pode ser determinado o campo elástico correspondente aos assentamentos de apoio e isolados os respectivos esforços

Pela sua elevada rigidez, a laje do ensoleiramento tem um grande contributo na uniformização dos deslocamentos verticais na fundação

Caso de Estudo **Faseamento Construtivo**

- Os efeitos da sequência construtiva resultam do facto de as estruturas entrarem em carga gradualmente durante a construção e deste modo ocorrendo deformações que se vão acumulando antes de toda a estrutura estar executada (e, se de betão, este ter entretanto endurecido)
- A sequência construtiva dos vários pisos, já que não é possível executá-los simultaneamente, é comum a todos os edifícios. No entanto os correspondentes efeitos podem ser desprezáveis nas estruturas de pequena altura.
- A solução estrutural do Caso de Estudo, com uma macro-estrutura executada antes do pavimento, origina ainda um efeito local de faseamento construtivo, que é independente do número de pisos

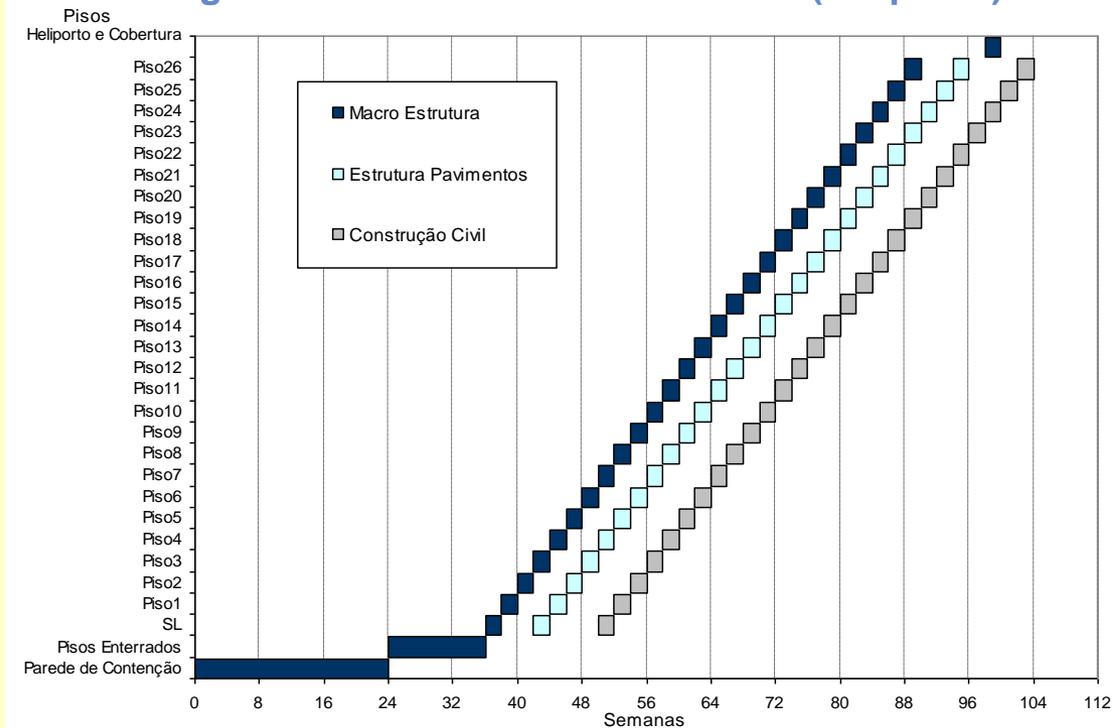
Os efeitos do faseamento construtivo manifestam-se a nível local, para cada pavimento, e a nível global, na estrutura como um todo

Caso de Estudo

Cronograma do Faseamento Contrutivo

Cronograma tipo (adoptado na simulação)

Cronograma do faseamento construtivo (adoptado)



- Paredes de contenção - já construídas até ao piso térreo quando as lajes dos pisos enterrados forem executadas.
- A macro-estrutura: 2 semanas por piso;
- Pavimentos: 2 semanas por piso;
- Execução de pavimento inicia-se após o escoramento da macro-estrutura do piso superior ser retirada: 4 semanas após a conclusão da construção da macro-estrutura do próprio piso.
- Construção civil de cada piso inicia-se 4 semanas após execução do pavimento desse piso

O planeamento construtivo é determinante para a evolução dos esforços na estrutura até à conclusão da estrutura e sua entrada em serviço (nas estruturas de betão armado os esforços evoluem ainda com os efeitos das retracção e fluência)

Modelação do faseamento Construtivo

- Para simular o faseamento construtivo desenvolveu-se um programa de cálculo permitindo representar uma estrutura variável, criando sucessivos modelos diferentes, com o mesmo número de graus de liberdade, barras, mas com diferentes matrizes de rigidez e vectores de forças.
- Estes modelos são então combinados de modo a obter os esforços e deslocamentos nas diferentes fases de vida da estrutura: durante a fase construtiva, imediatamente após o edifício entrar em serviço e a longo prazo.
- As acções actuando durante a fase construtiva são fundamentalmente os pesos próprios da estrutura e uma sobrecarga de serviço. Os acabamentos dos primeiros pisos iniciam-se ainda durante a fase de construção pelo que as respectivas cargas são também consideradas, considerando o seu desfasamento.
- Os esforços e deslocamentos durante a fase de construção são o acumulado dos que se obtêm com estes diferentes modelos.

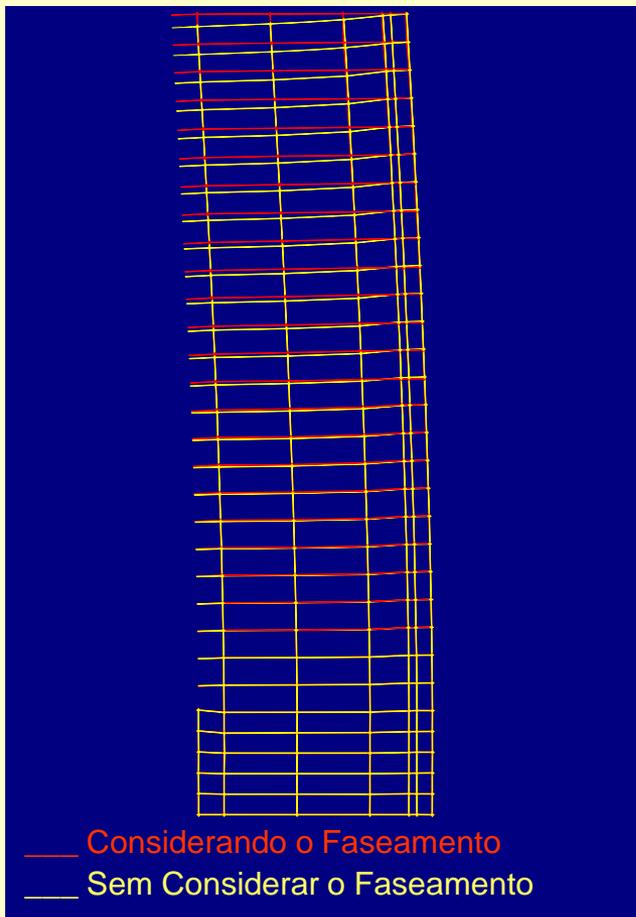
O modelo tridimensional da estrutura deve permitir uma análise tendo em conta as diferentes fases construtivas

Faseamento construtivo

Efeito Global

Deformada do edifício (eixo 2)

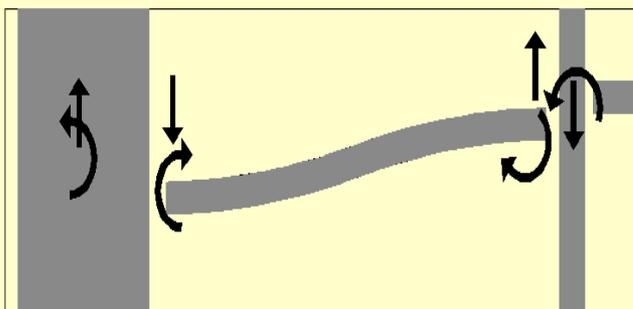
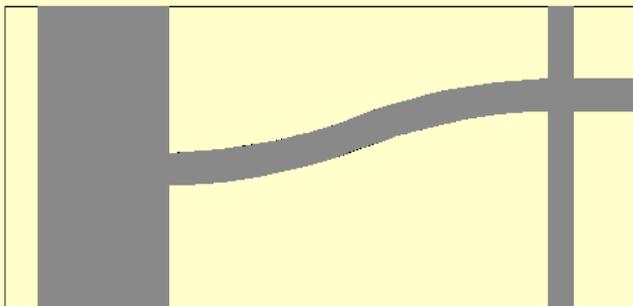
Edifício de 30 Pisos



- Durante a construção dá-se a deformação dos elementos verticais para os pesos próprios das estruturas levantadas, sobrecargas de serviço e acabamentos já iniciados
- Pavimentos são construídos sobre uma estrutura que entretanto já sofreu deformações, não sendo portanto influenciados por elas
- Nas análises correntes, em que se considera a estrutura como um todo, as deformações axiais em pilares e paredes e, em consequência, os deslocamentos relativos na laje são sobrestimados

A importância do faseamento construtivo aumenta com a altura do edifício e com peso relativo das cargas permanentes já presentes durante a construção

Esforços induzidos



- As retracção higrométrica e fluência do betão e as variações de temperatura podem induzir extensões diferentes nos vários elementos verticais
- Se o desenvolvimento dos elementos verticais for elevado a integração da extensão em altura pode corresponder a “assentamentos diferenciais” importantes entre elementos vizinhos.
- A imposição de deslocamentos verticais diferenciais em zonas junto a apoios de elementos horizontais (lajes e vigas) podem originar esforços importantes
- Se existirem elementos horizontais muito rígidos (p ex. vigas de grande inércia) pode mesmo ocorrer uma redistribuição de esforços com transferência de carga para pilares que “encurtam” menos

Os efeitos destas acções dependem também do comprimento dos elementos verticais e da rigidez dos elementos horizontais

Variação da Temperatura e Retracção

Situações críticas

- Materiais distintos em elementos verticais (p.ex. Pilares metálicos e núcleos de betão armado em que apenas os segundos sofrem efeito da retracção)
- Sequência construtiva em que núcleo de betão armado é executado numa fase inicial tendo já sofrido o efeito inicial da retracção quando os pilares são construídos
- Elementos verticais com rácio de volume/área e % de armadura muito diferentes (p.ex. pilares com grande % de armadura junto a paredes)
- Elementos verticais sujeitos a diferentes valores de temperatura ambiente (p.ex^o. elementos exteriores não protegidos e interiores com aquecimento/ar condicionado ou exteriores mas à sombra)

Têm que estar reunidas certas condições para o efeito em altura da variação de temperatura e retracção ter relevância.

- Efeito da fluência e retracção pode ser reduzido:
 - Usando betões de classe resistente elevada e baixa relação água/cimento
 - Em ambientes com níveis elevados de humidade relativa
 - Elementos verticais, pilares e paredes constituídos pelo mesmo material e betonados em simultâneo
- Efeito da variação de temperatura :
 - Dependente das variação térmica sazonal e diárias
 - Gradientes térmicos dependentes da forma de insolação
 - Dependente da protecção das fachadas

A adopção de medidas construtivas adequadas pode reduzir os efeitos de variações de temperatura, fluência e retracção higrométrica

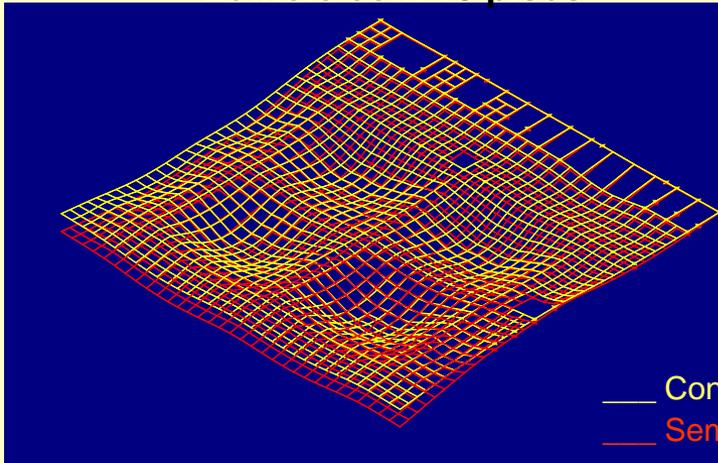
Agenda

- Principais desafios de edifícios de grande altura
- Caso de Estudo: Edifícios de 20, 30, 45 e 60 pisos
- Análise estrutural comparativa para diferentes números de pisos

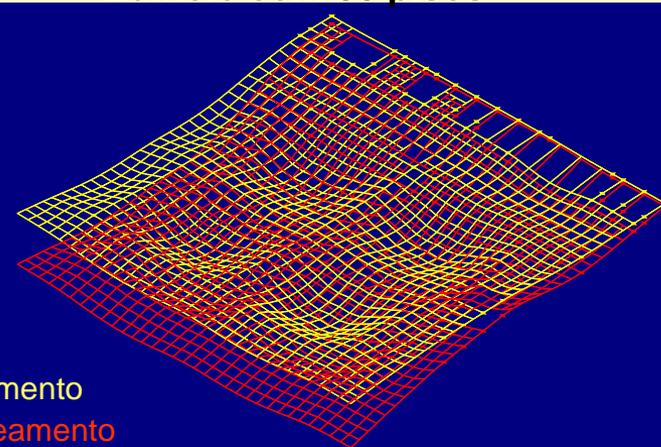
Faseamento construtivo

Análise de resultados: Deformada do último piso

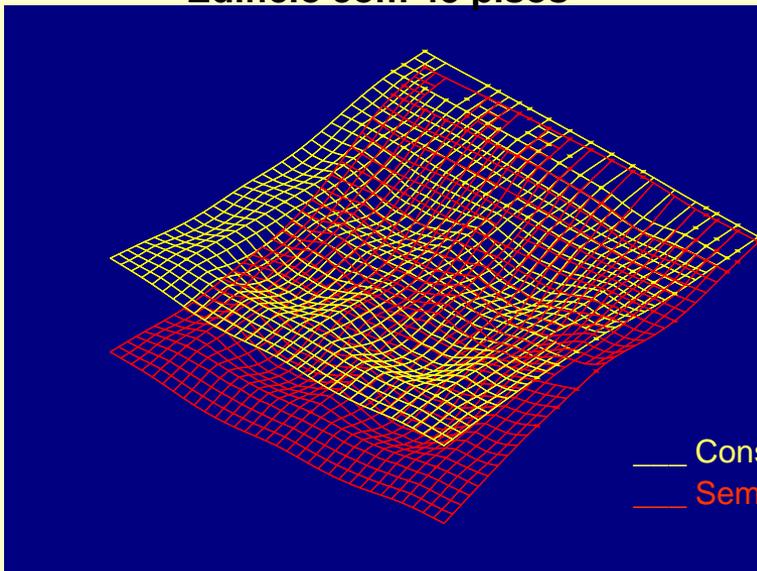
Edifício com 15 pisos



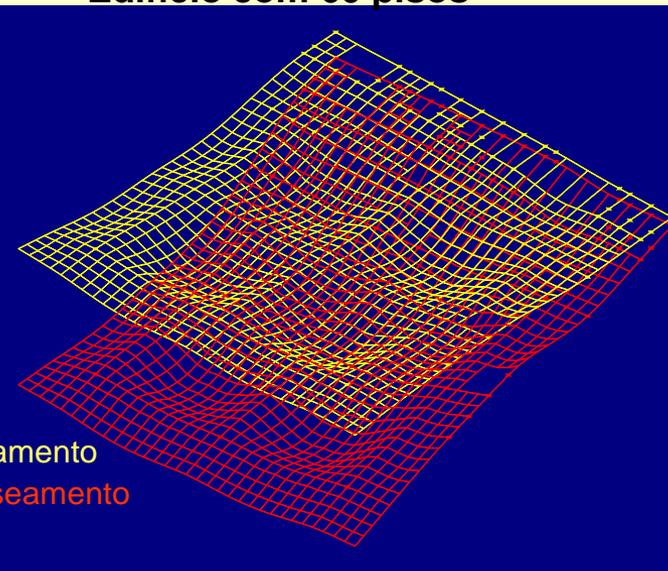
Edifício com 30 pisos



Edifício com 45 pisos



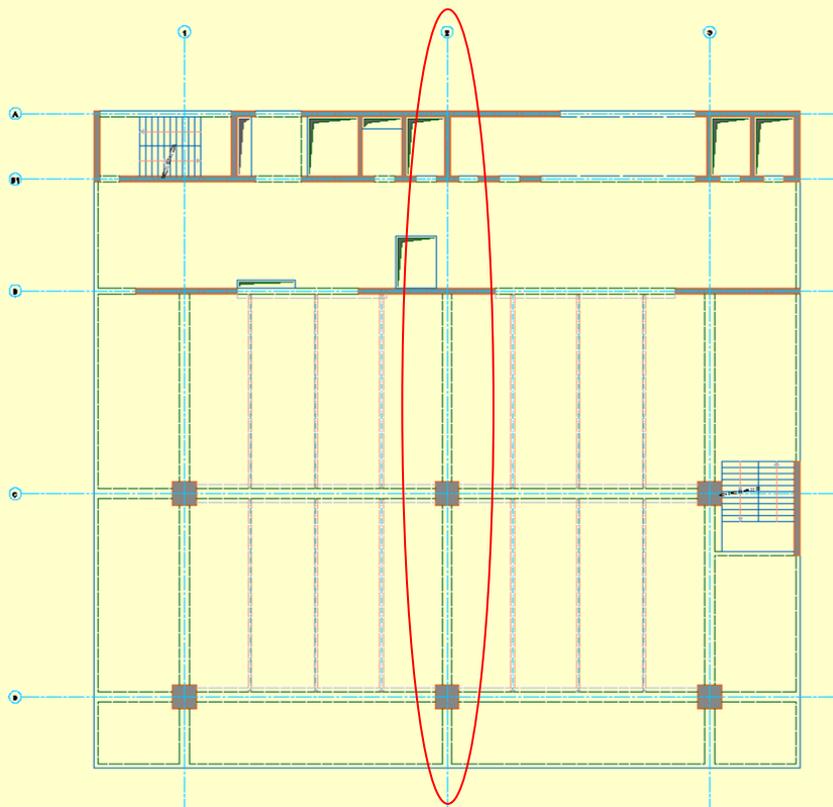
Edifício com 60 pisos



Como esperado, o efeito da sequência construtiva cresce em altura

Faseamento construtivo Alinhamento analisado

Planta do piso tipo – alinhamento analisado

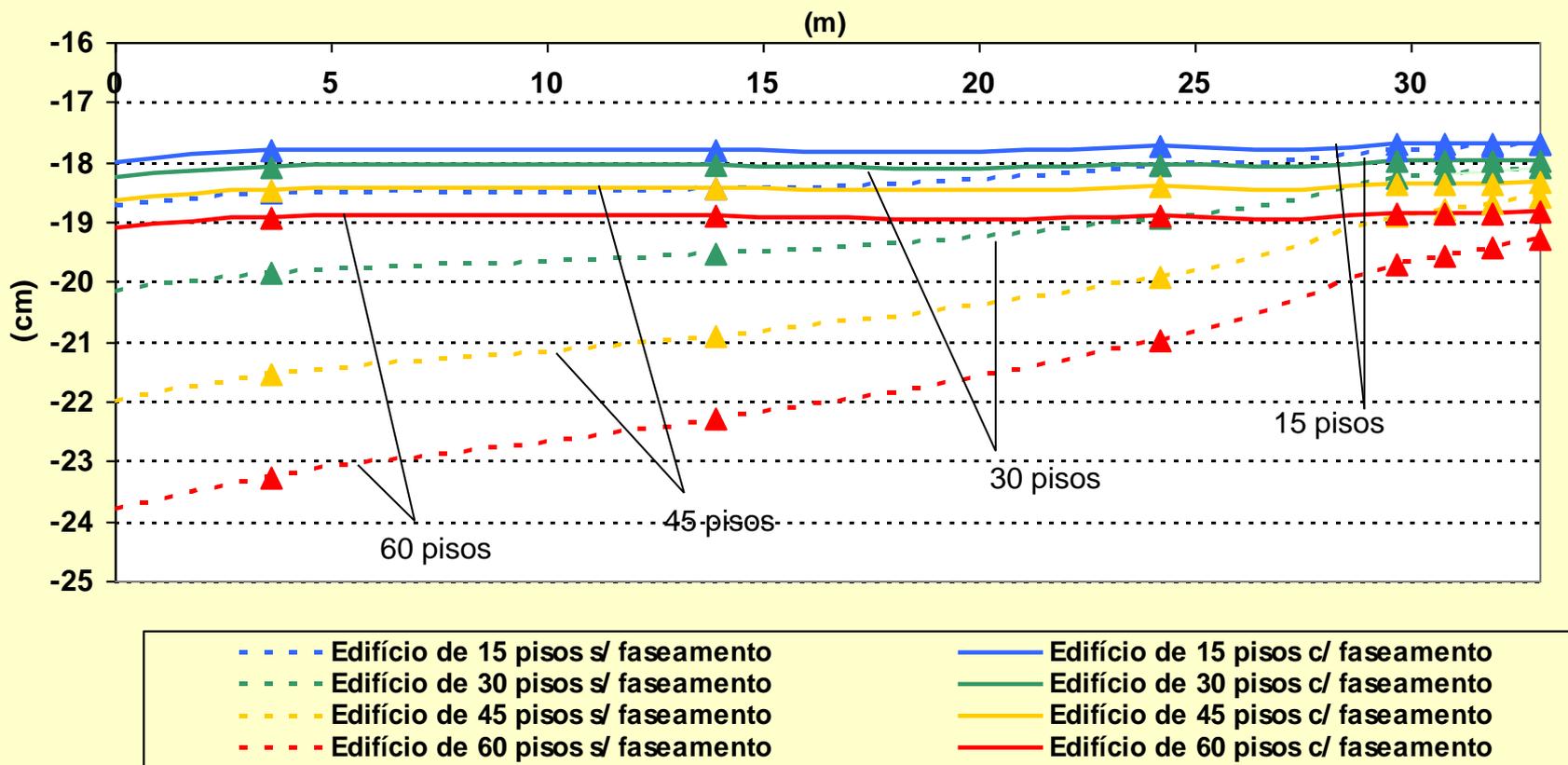


- Será analisado o alinhamento do eixo 2
- Razão da escolha
 - Vigas
 - Paredes e pilares
 - Estrutura não simétrica
 - Pilares com maior área de influência

A comparação entre os diferentes modelos baseou-se no alinhamento em que efeitos são mais pronunciados

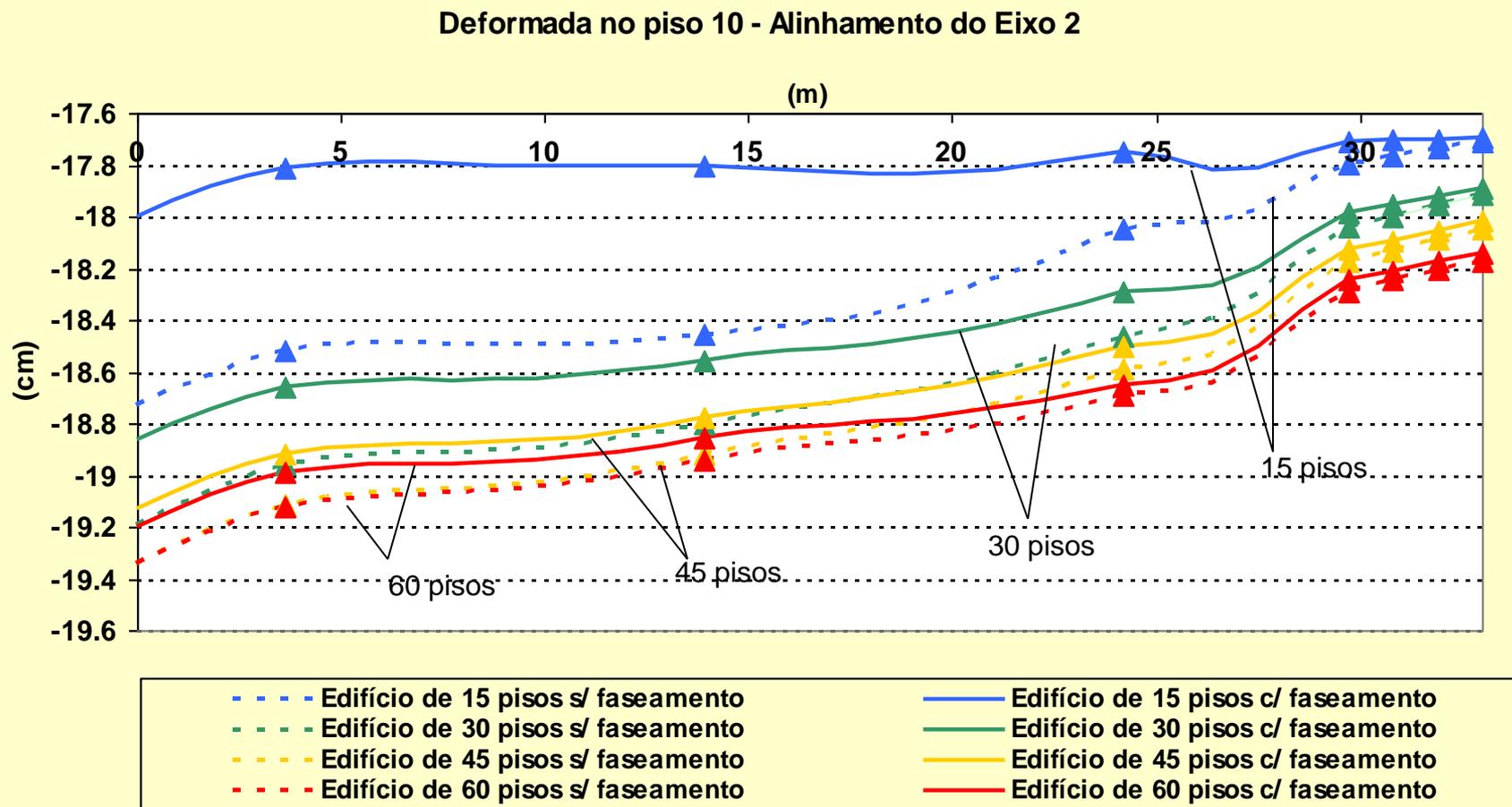
Faseamento construtivo Deformada do Último Piso dos Diferentes Edifícios

Deformada no último piso - Alinhamento do Eixo 2



Os efeitos do faseamento construtivo nos deslocamentos no último piso aumentam com a altura e número de pisos do edifício

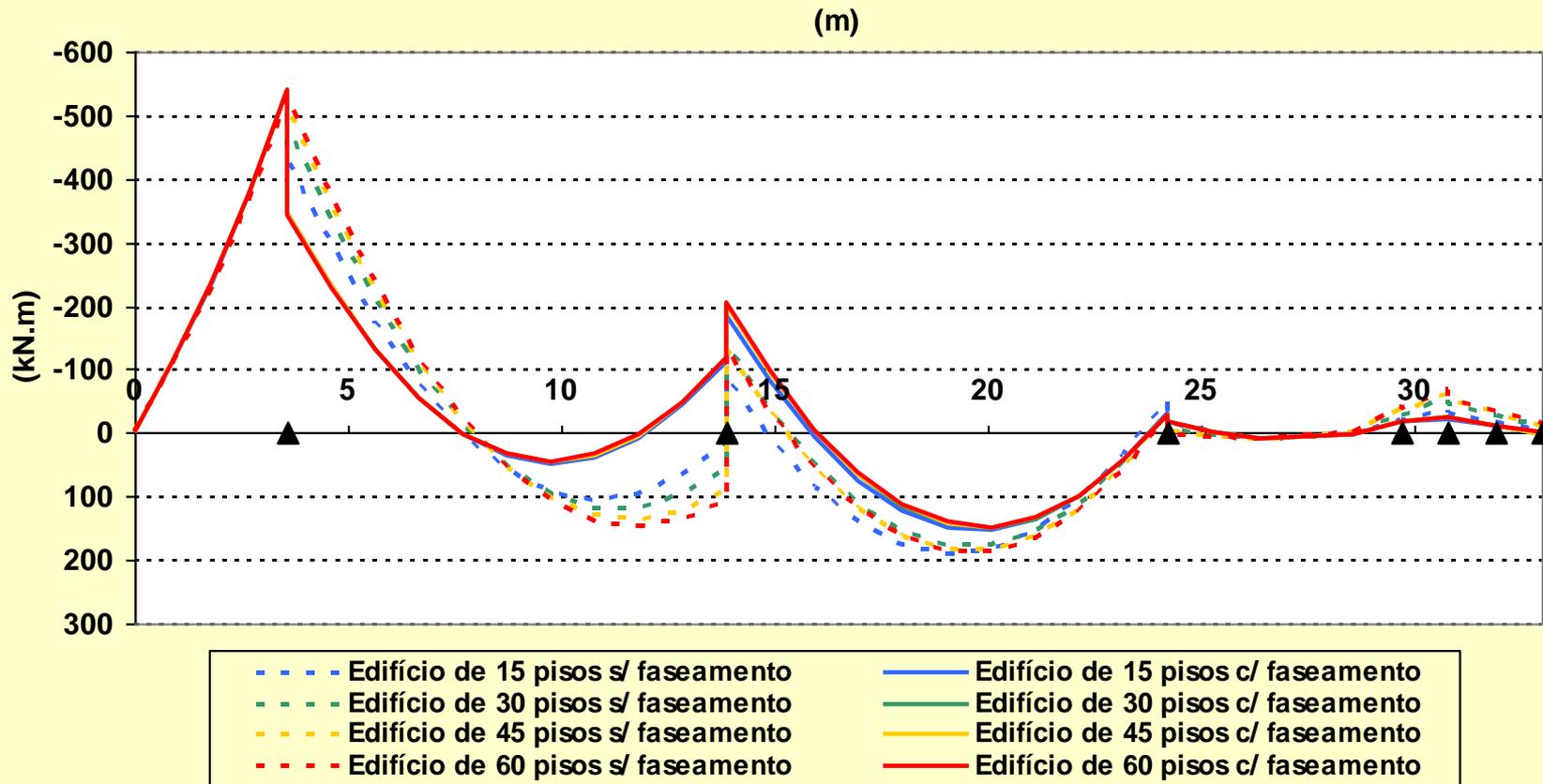
Faseamento construtivo Deformada do Piso 10 dos Diferentes Edifícios



Os efeitos do faseamento construtivo diminuem com o número de pavimentos a executar posteriormente

Esforços no Último Piso dos Diferentes Edifícios

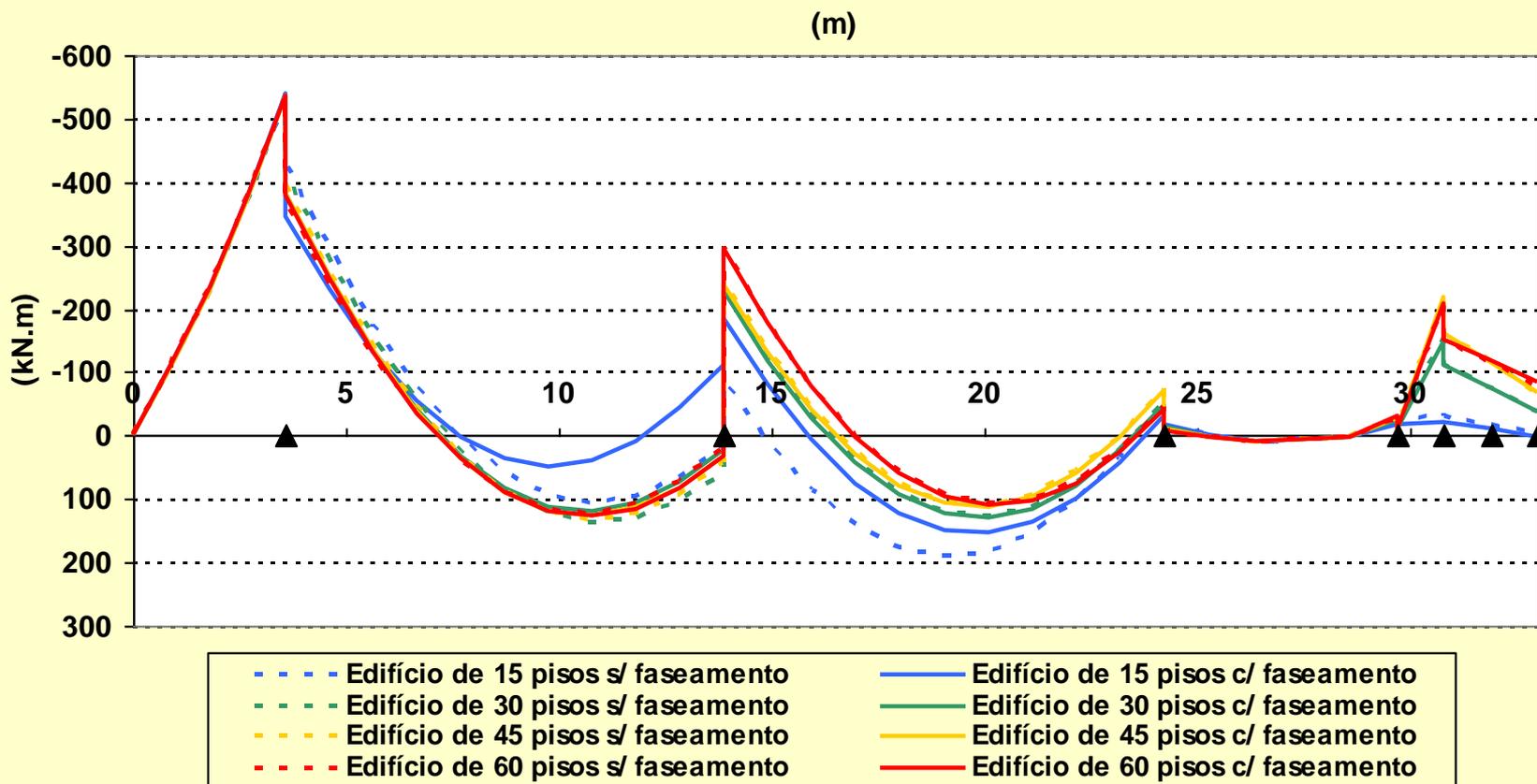
Diagrama de Momentos Flectores no último piso - Alinhamento do eixo 2



Apenas se for considerado o faseamento construtivo se aproximam os valores dos esforços no último piso dos diferentes edifícios

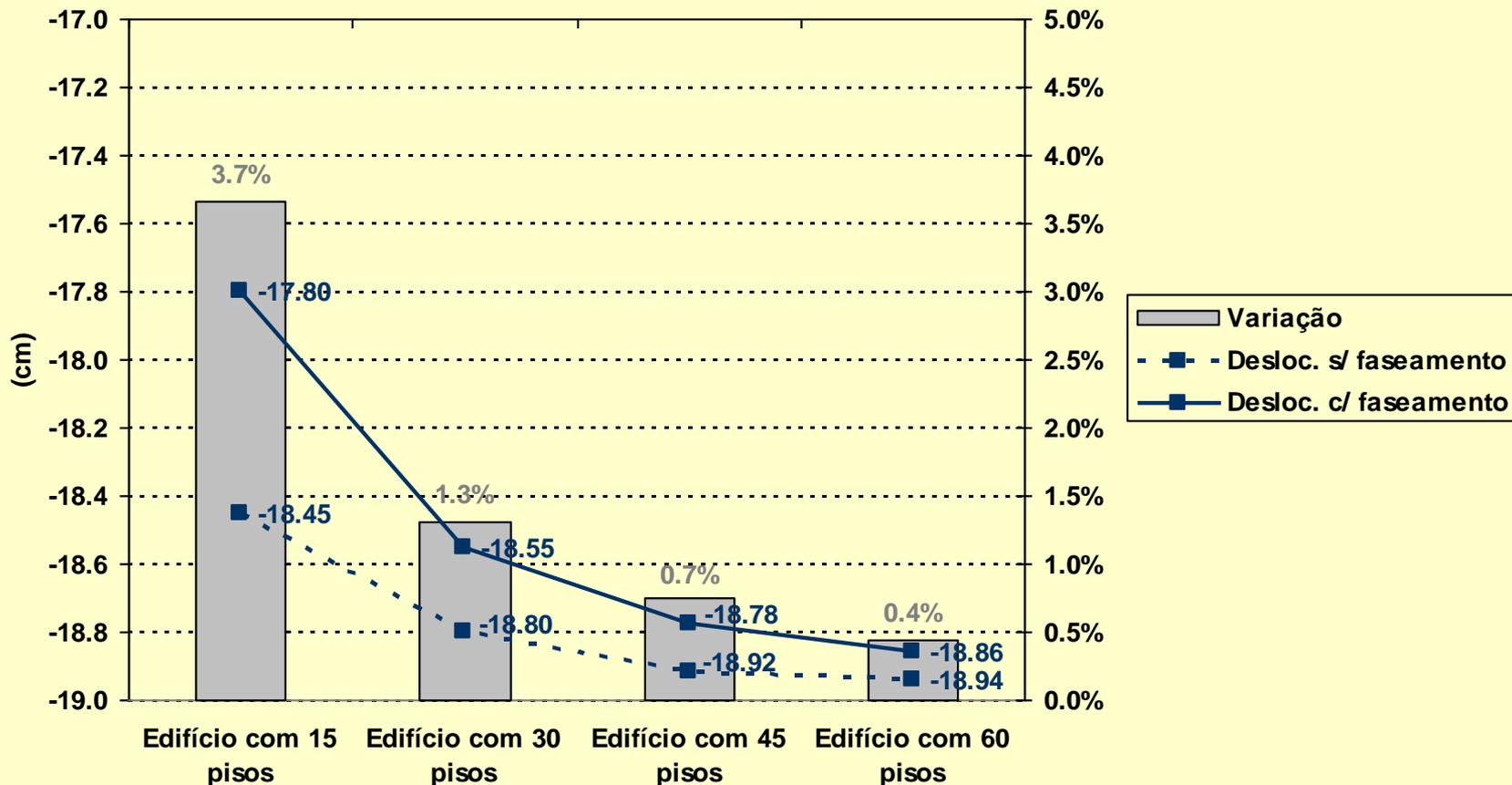
Esforços no Piso 10 dos Diferentes Edifícios

Diagrama de Momentos Flectores no piso 10 - Alinhamento do eixo 2



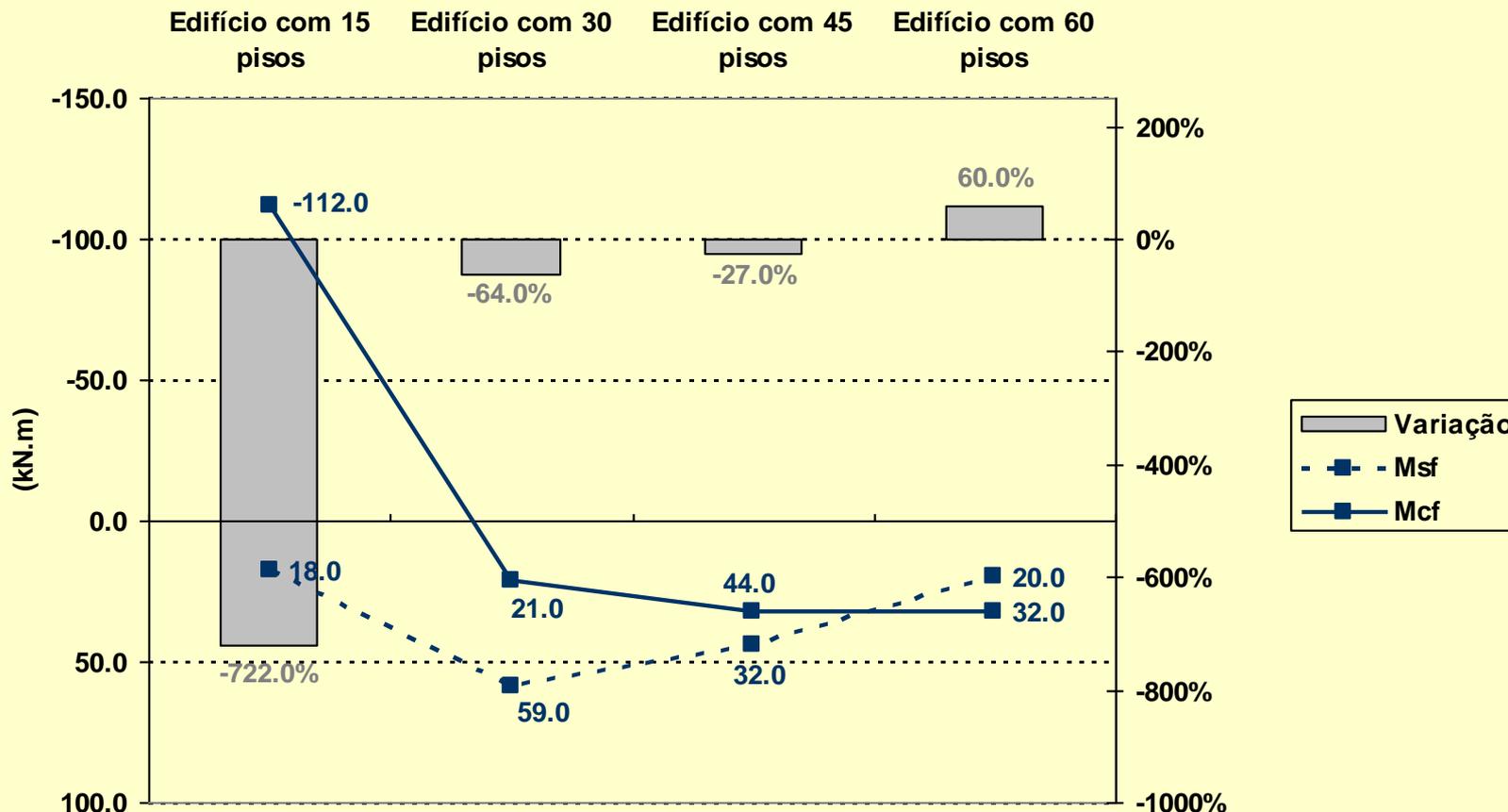
Quanto maior o número de pisos a construir acima de um dado piso menores as consequências do faseamento construtivo

Variação do deslocamento no pilar central do eixo 2



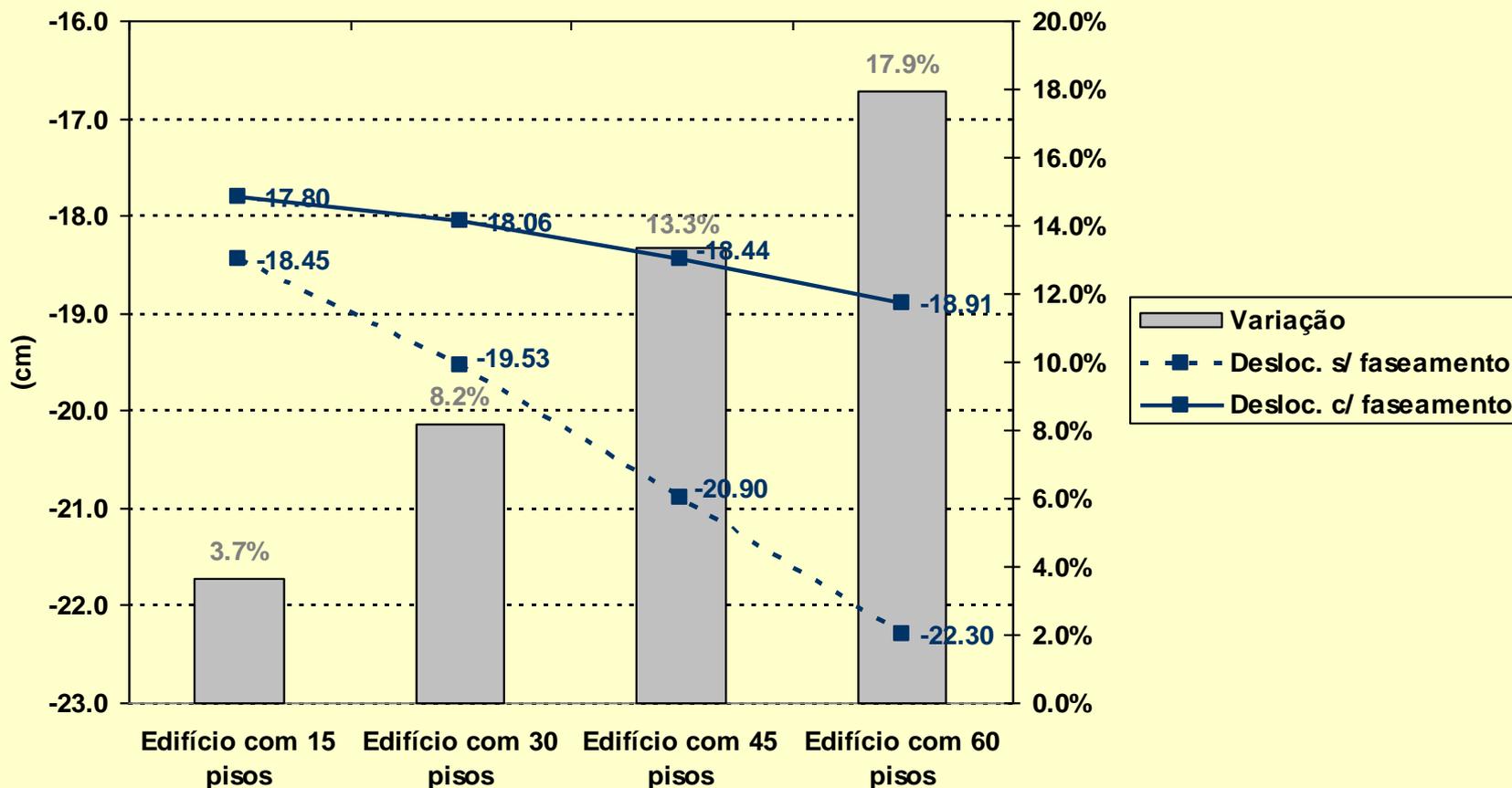
Para um dado edifício os efeitos do faseamento construtivo ao nível dos deslocamentos são mais reduzidos nos pisos inferiores

Variação do Momento flector numa viga adjacente ao pilar central do eixo 2



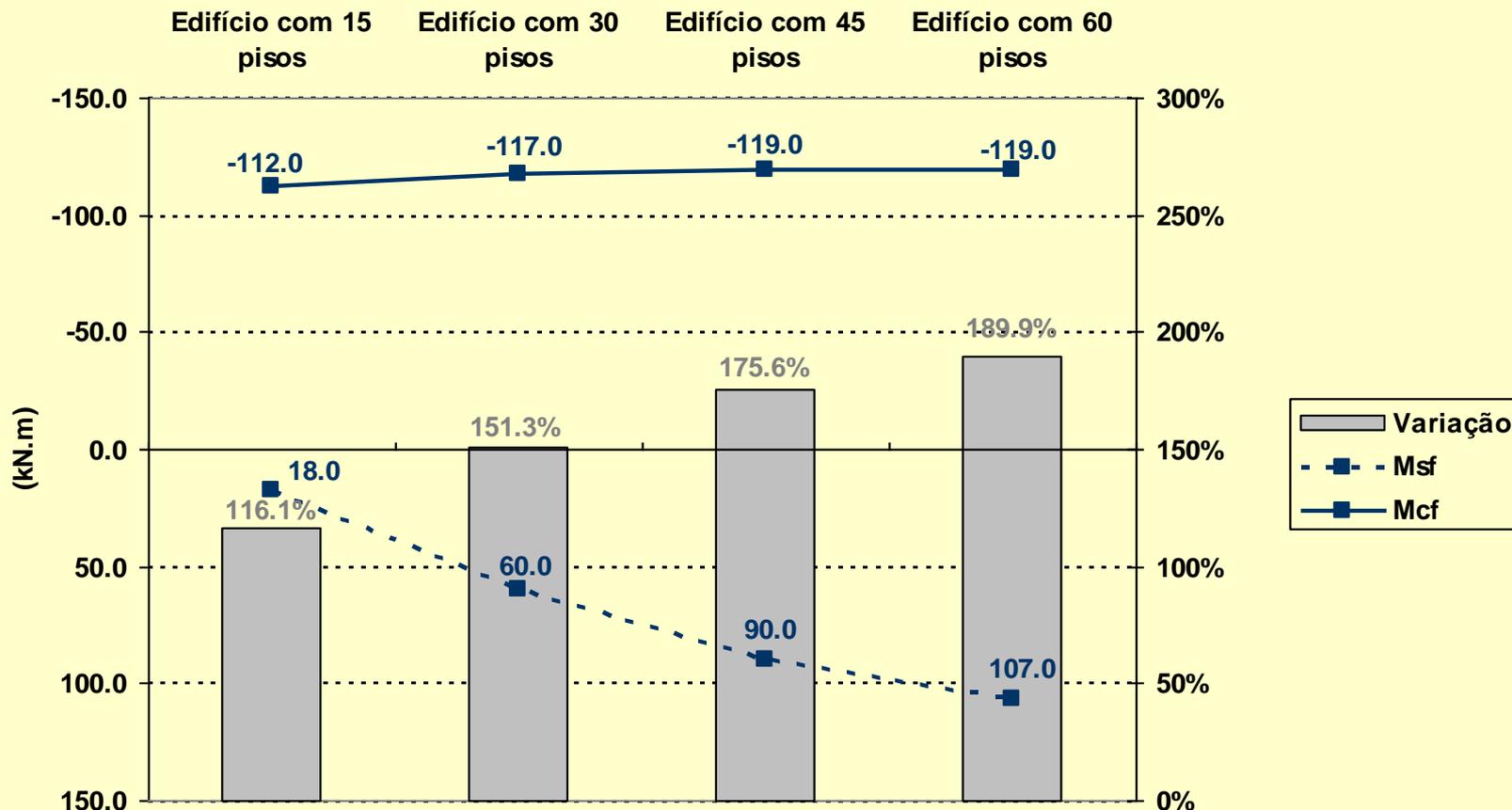
Nunca sendo de desprezar, o erro na determinação de esforços diminui com a posição relativa do piso no edifício

Variação do deslocamento no pilar central do eixo 2



Para os deslocamentos verticais no topo, o erro varia entre 4% (edifício de 15 pisos) e 18% (edifícios de 60 pisos)

Variação do Momento Flector na viga adjacente do último piso adjacente ao pilar central do eixo 2

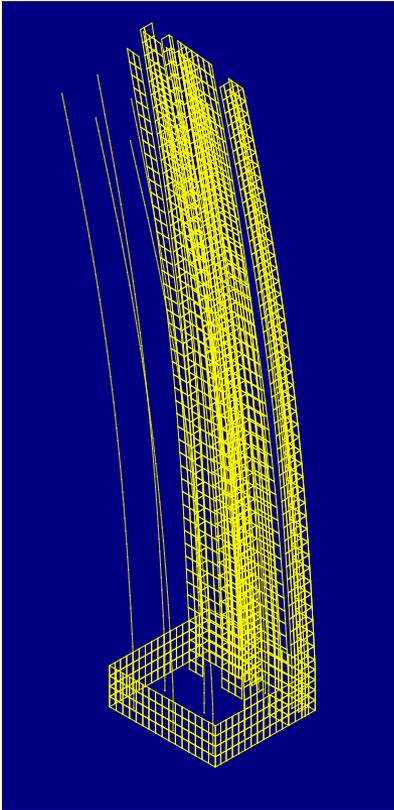


O gráfico dispensa comentários. A não consideração do faseamento construtivo pode conduzir à catástrofe!

Análise estrutural comparativa

Efeitos de 2ª ordem no Caso de Estudo

Deformada do Pórtico Tridimensional para a Combinação Quase Permanente

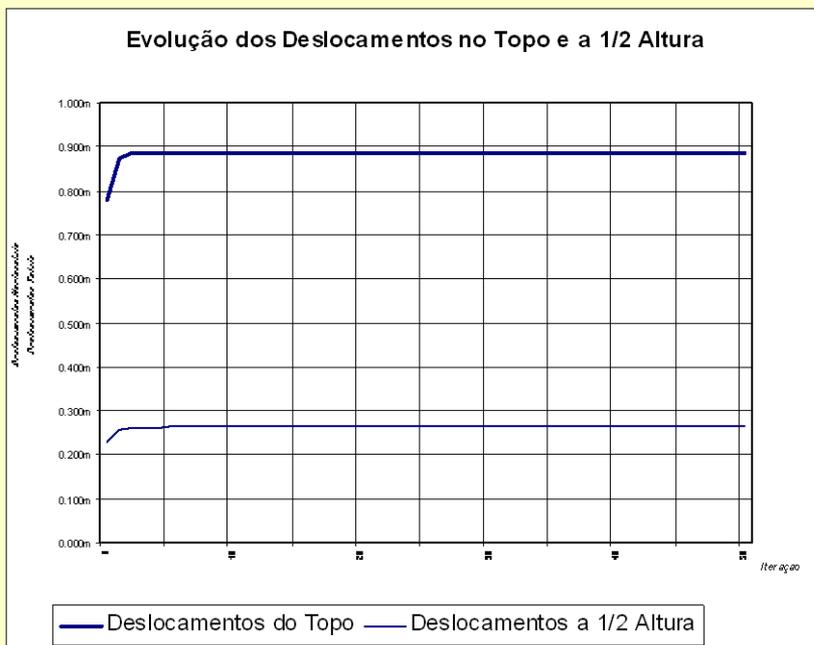


- Deslocamentos horizontais elevados devido a:
 - Elevada flexibilidade, grande altura para área de implantação reduzida
 - Acções horizontais crescentes com a altura, tanto o vento como imperfeições geométricas
 - Falta de simetria, originando uma curvatura devido à maior deformação dos pilares sob acções gravíticas
- Excentricidade resultante origina momentos internos adicionais, de 2ª ordem, que agravam as deformações
- Deve ser considerado um factor de amplificação, $P\Delta$, cuja determinação requer um processo iterativo

A elevada flexibilidade e falta de simetria de um edifício conduzem a esforços de 2ª ordem que não devem ser desprezados

Efeitos de 2ª ordem Modelo de cálculo

Cálculo iterativo dos deslocamentos incrementais



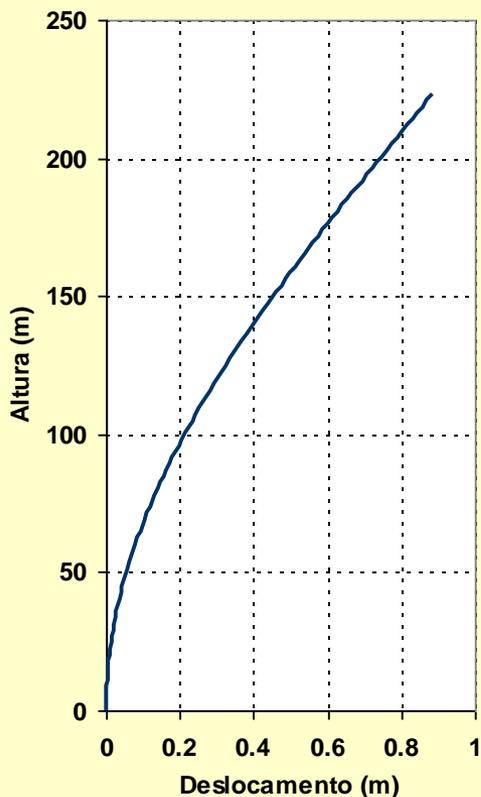
- Processo iterativo medindo os deslocamentos incrementais devido às excentricidades existentes
- Modelo simplificado em que a estrutura é estudada como uma coluna:
 - Inércia e área correspondente às secções dos elementos verticais em cada piso
 - Peso específico: acções gravíticas / volume
 - Encastramento ao nível do Piso -1
- Excentricidade inicial devido a:
 - Acções gravíticas
 - Vento
 - Imperfeições geométricas iniciais

Após a convergência do processo são determinadas as excentricidades de 2ª ordem.

Efeitos de 2ª ordem

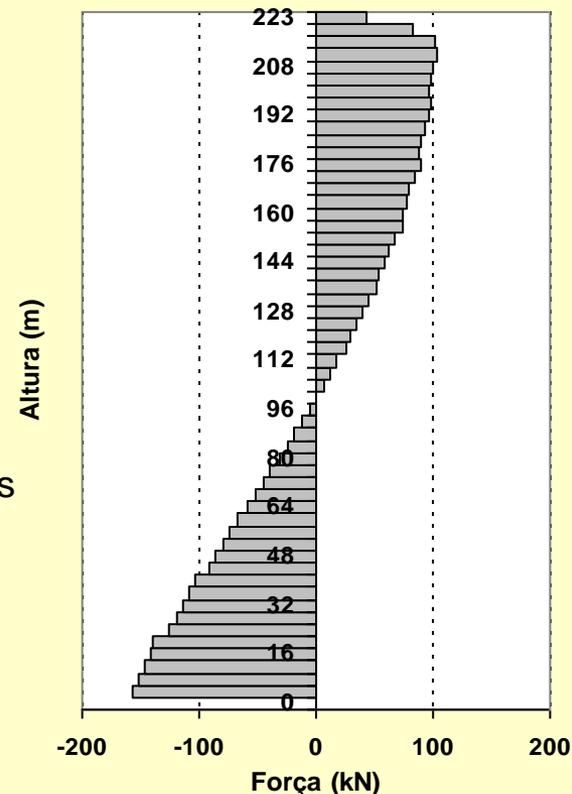
Determinação de esforços de 2ª ordem para o edifício de 60 pisos

Deformada - Deslocamentos Totais



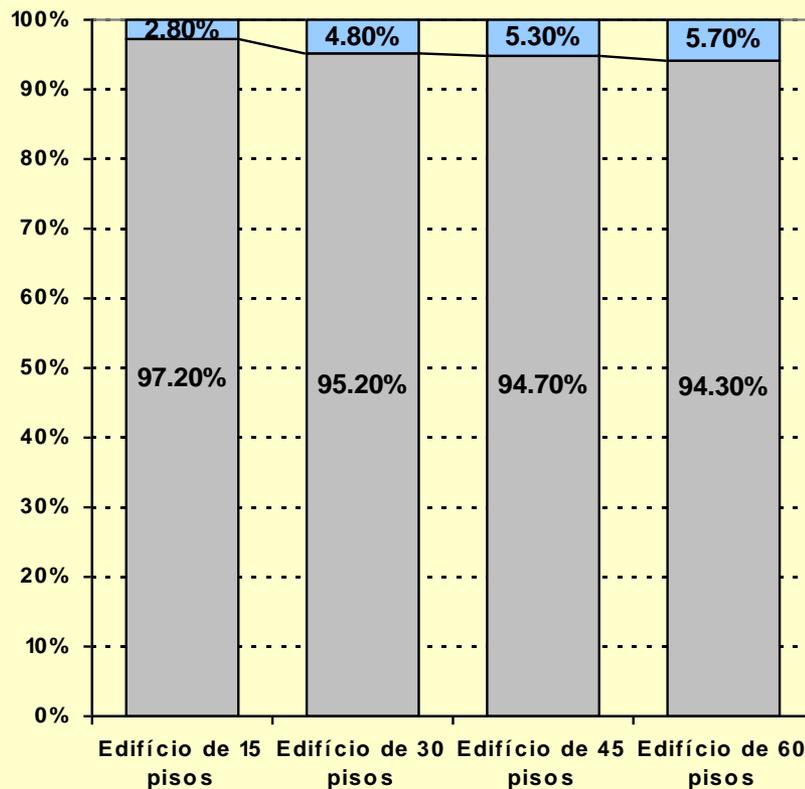
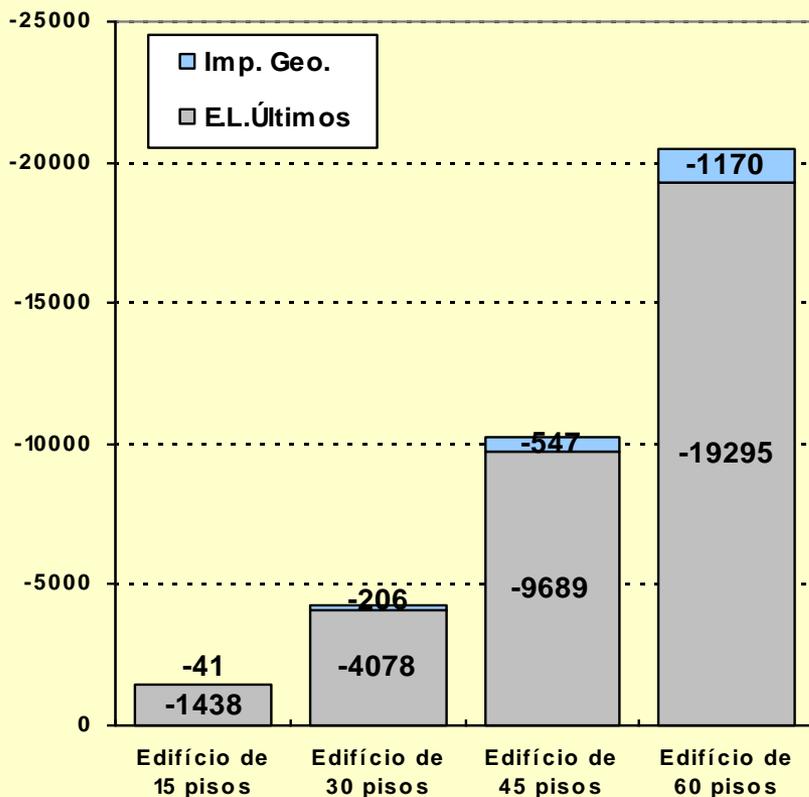
- Com base nos deslocamentos finais, 1ª e 2ª ordem, são calculados os momentos totais na estrutura ao nível de cada piso
- São determinadas as forças horizontais equivalentes a estes esforços incrementais e aplicadas no modelo tridimensional

Forças equivalentes



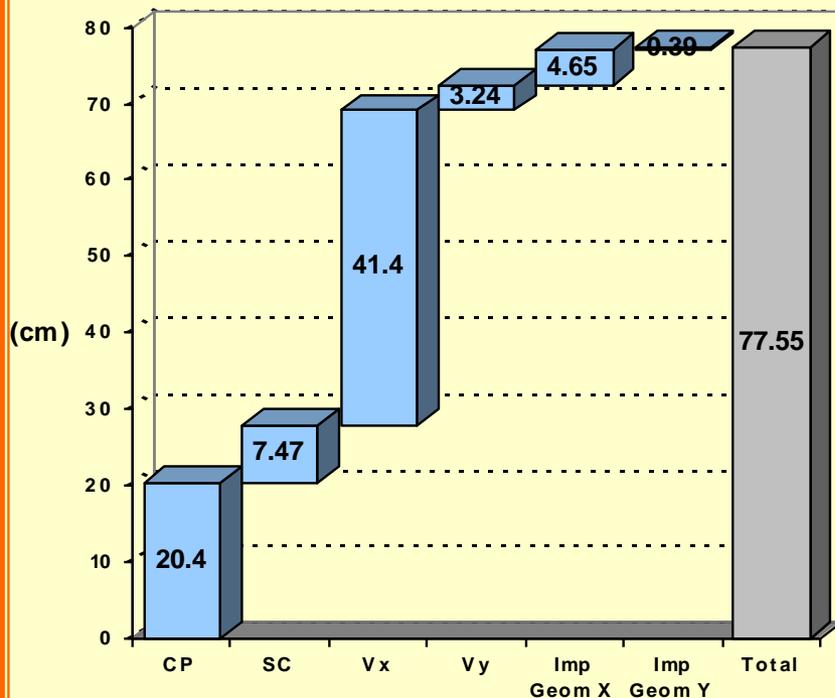
Os efeitos de 2ª ordem são determinados através da introdução de forças horizontais equivalentes (produzindo a mesma deformação).

Momento flector do pilar 2D ao nível do piso 0

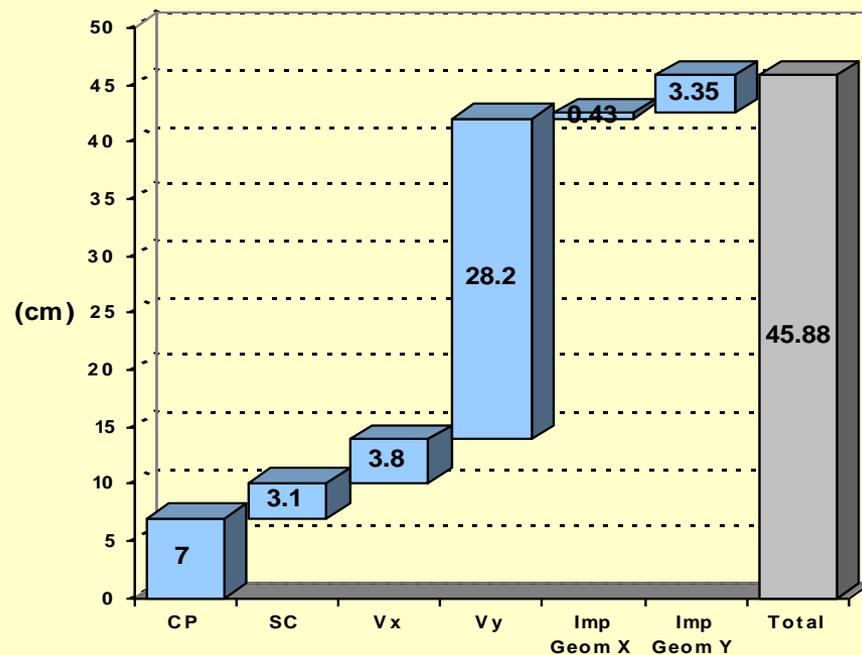


Os deslocamentos horizontais provocados por acções gravíticas em edifícios com fortes assimetrias podem originar esforços importantes em edifícios de grande altura

Δx no topo do Edifício



Δy no topo do Edifício

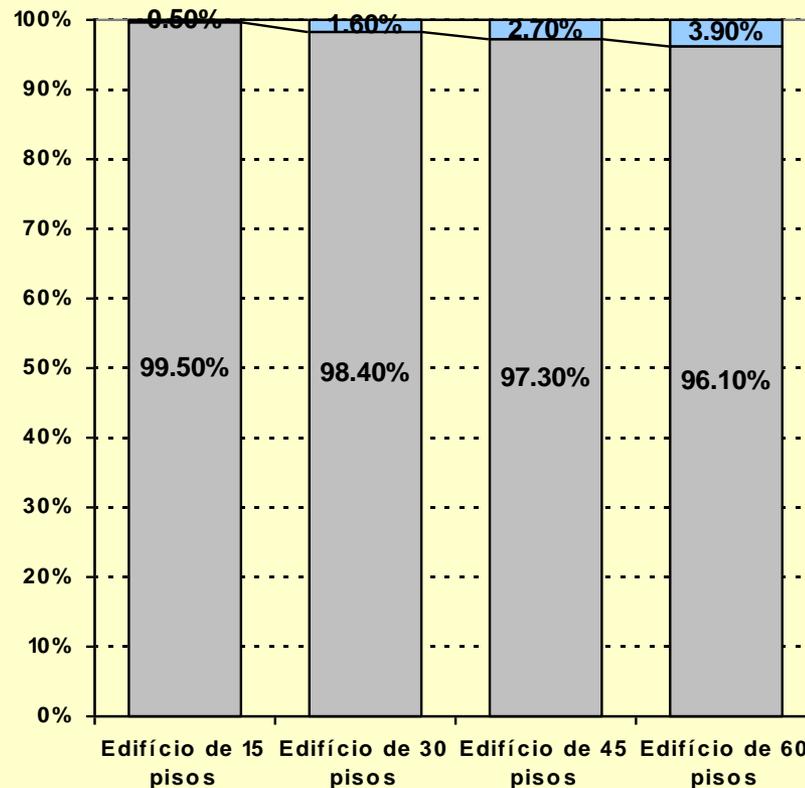
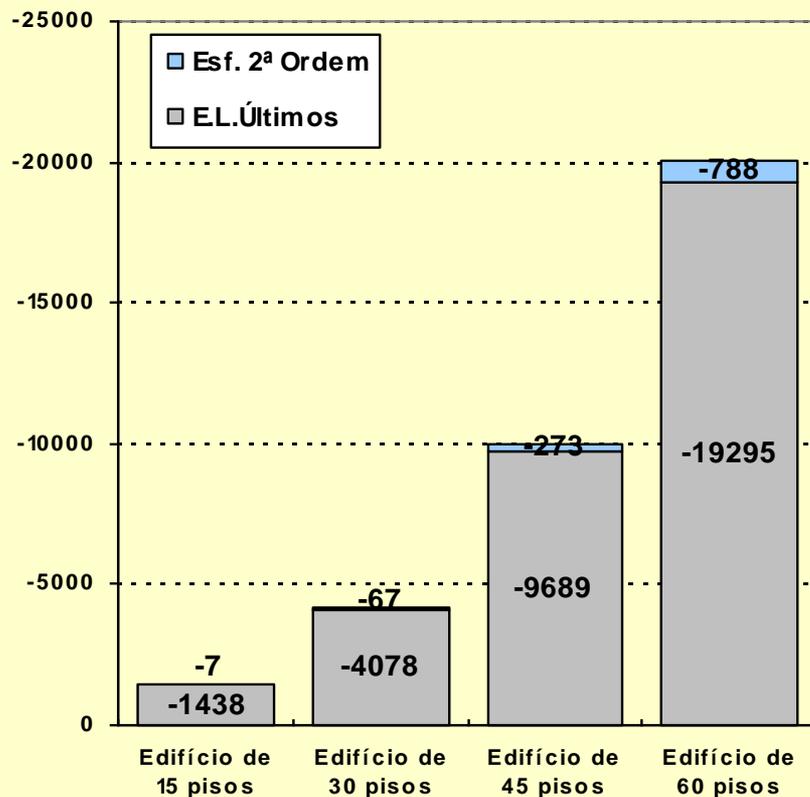


A estrutura é mais flexível segundo x e nesta direcção as cargas gravíticas originam deslocamentos importantes.

Efeitos de 2ª ordem

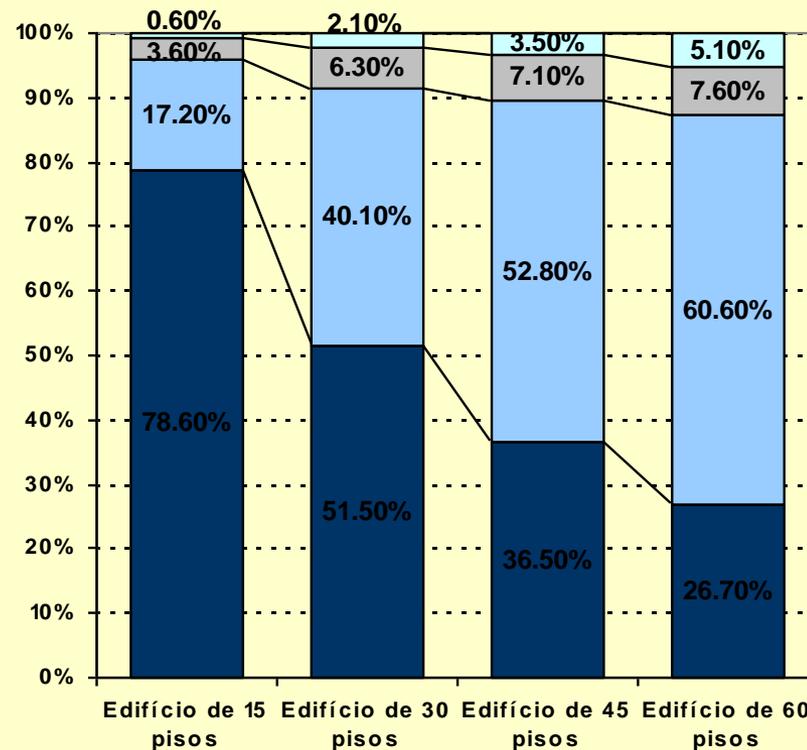
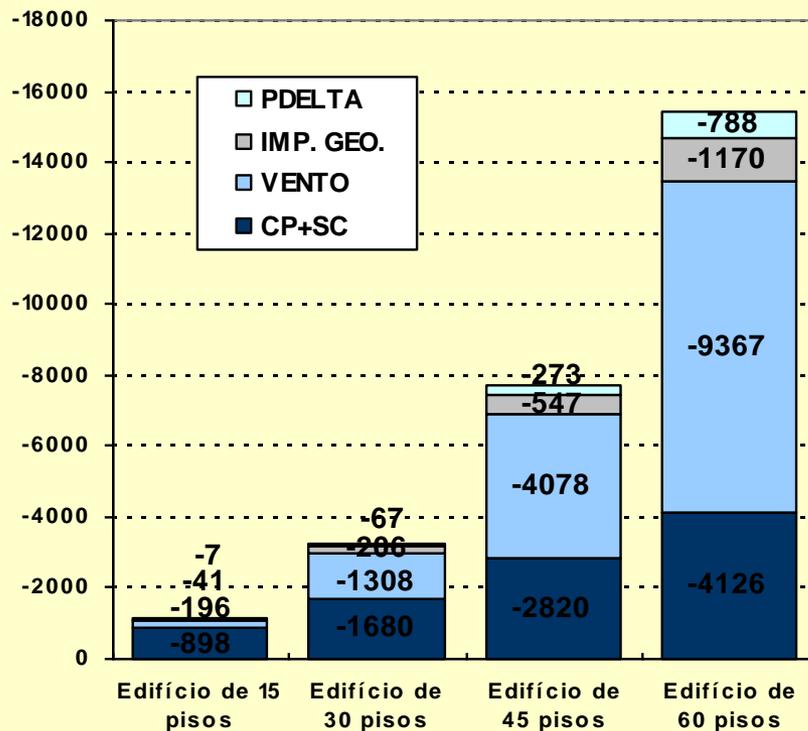
Peso dos efeitos de 2ª ordem nos esforços de flexão em pilares

Momento flector do pilar 2D ao nível do piso 0



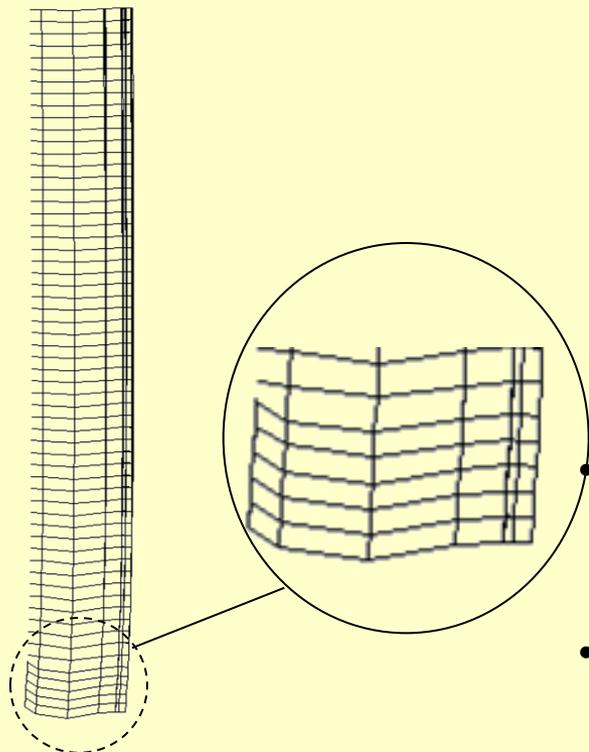
A importância dos efeitos de 2ª ordem cresce com o número de pisos

Momento flector na base do pilar 2D



Os deslocamentos horizontais dos pisos consequência de assimetrias e o seu agravamento por não linearidades geométricas conduz a um agravamento dos esforços de flexão em pilares, que em edifícios de grande altura podem representar mais de 10% do total

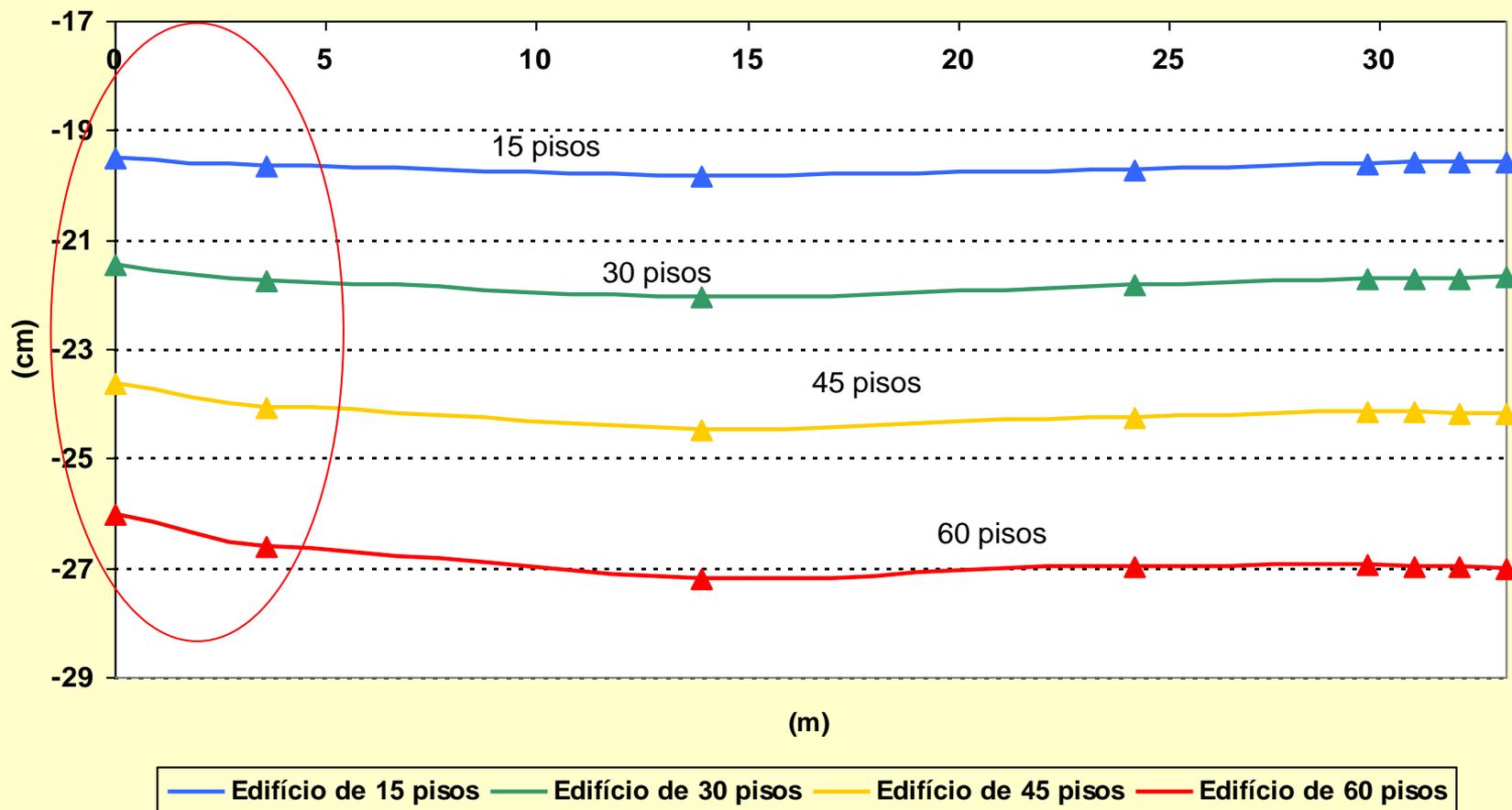
Deformada para
Assentamentos de Apoio



- Os assentamentos do edifício são importantes:
 - Elevado número de pisos tem como consequência descarga verticais elevadas na fundação
 - O solo com pode comportar tensões admissíveis elevadas mas deformável:
 - $SPT > 60$ pancadas $\Rightarrow \sigma_{adm} = 0.600$ MPa
 - Considerado maciço de fundação com módulos de deformabilidade $E=220$ MPa
- Esforços na estrutura são originados não pelo valor total dos assentamentos mas pelos deslocamentos relativos
- Deslocamentos relativos diminuem em altura, ao contrário das deformações axiais dos elementos verticais

Assentamentos de apoio
Assentamentos de apoio no piso -4

Deformada no piso -4 - Alinhamento do Eixo 2

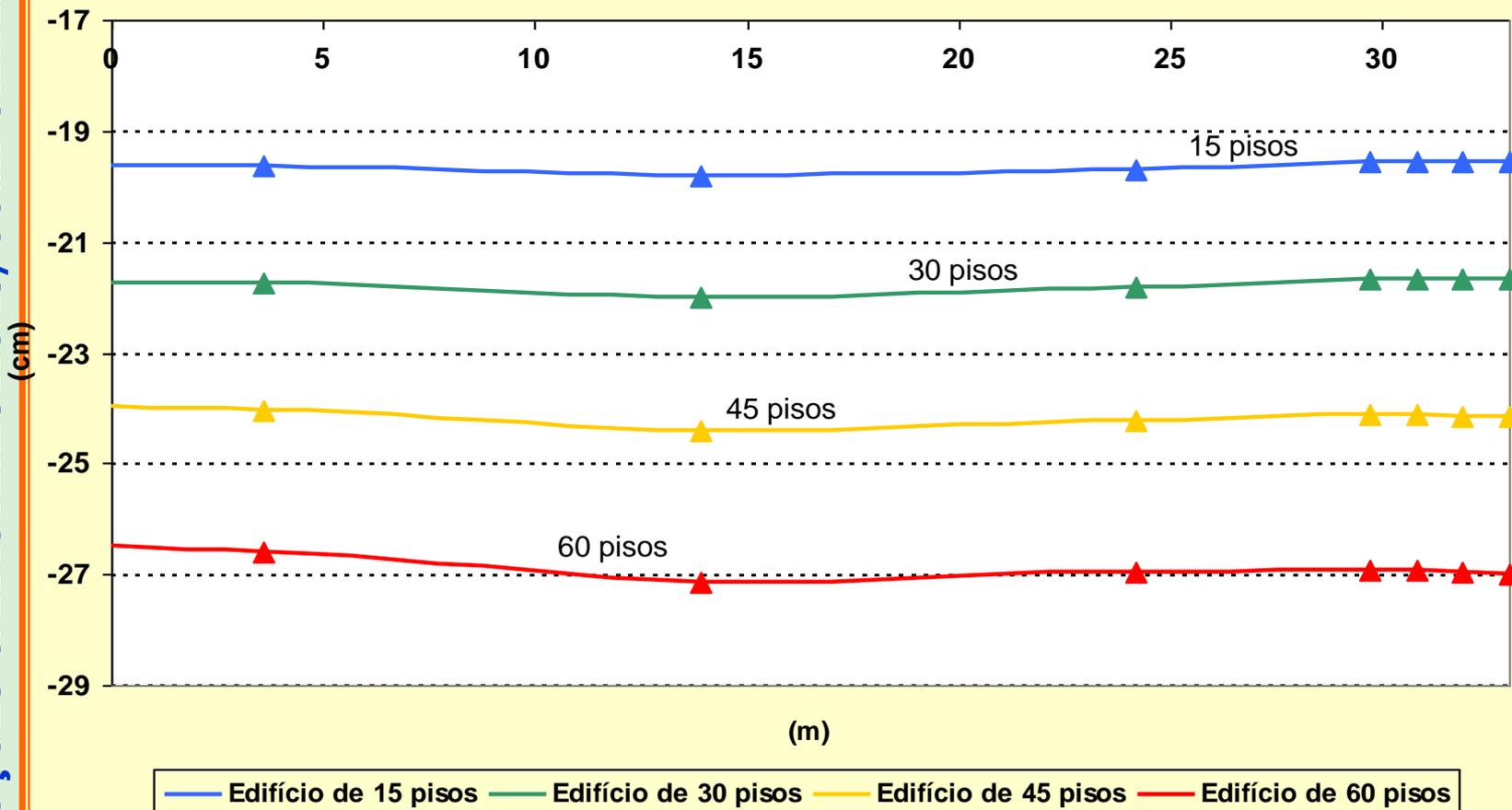


Assentamentos diferenciais importantes entre a parede de contenção e o pilar do eixo 2/D, que aumentam com o número de pisos do edifício

Assentamentos de apoio

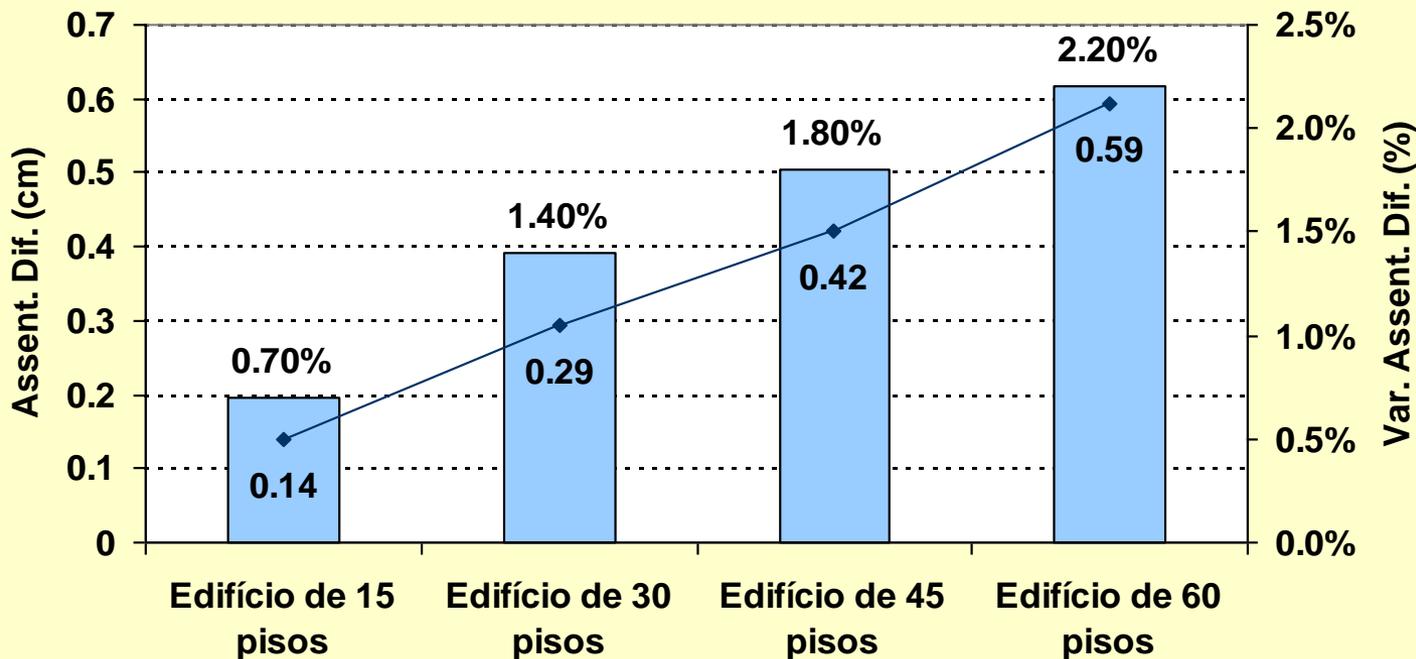
Deslocamentos Verticais por assentamentos no piso 1 dos diferentes edifícios

Deformada no piso 1 - Alinhamento do Eixo 2



Assentamentos diferenciais muito menores do que no piso -4

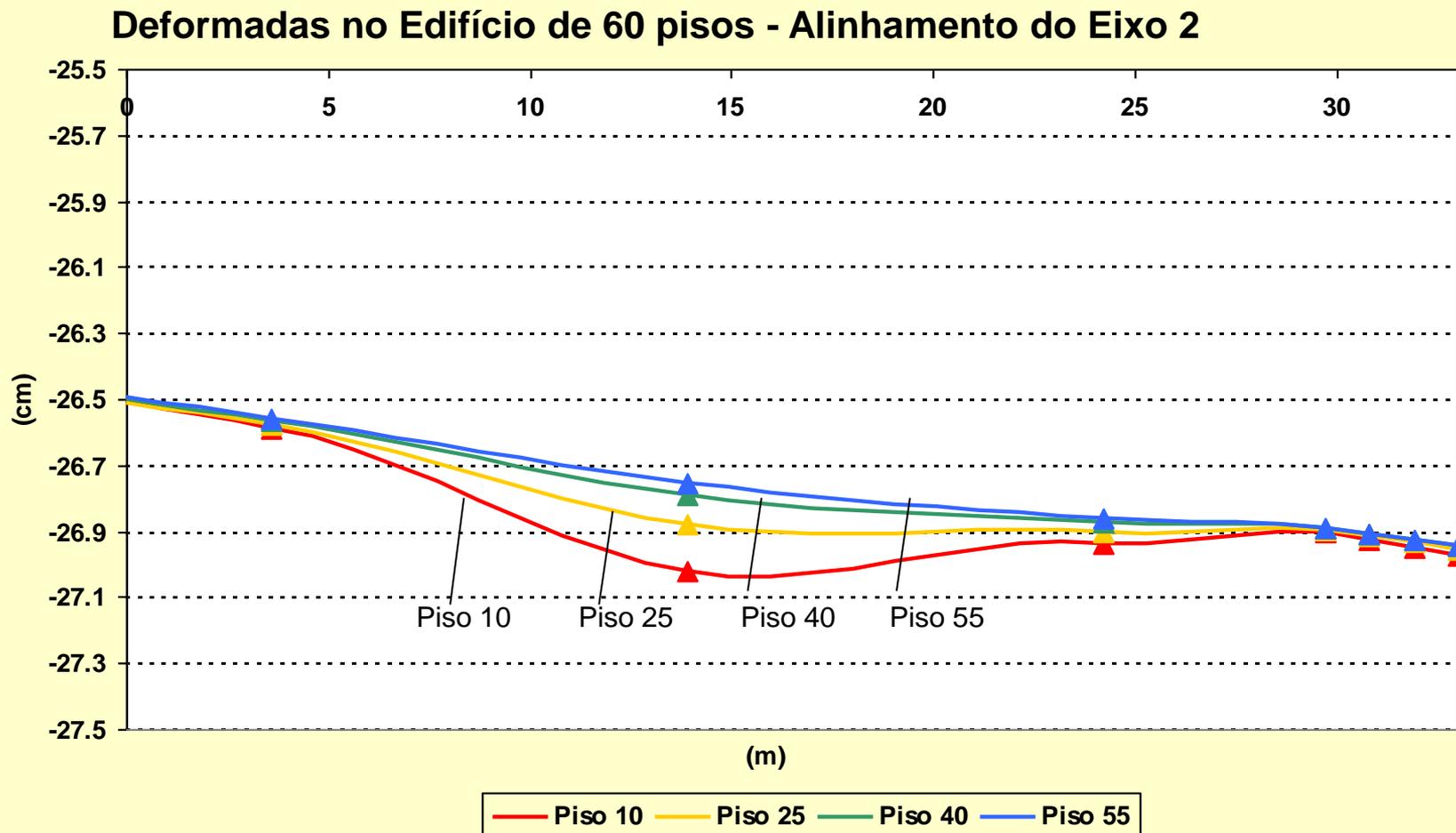
Assentamentos diferenciais entre parede e pilar nos eixos 2/D no piso -4



Assentamento diferencial entre parede e pilar 2D: $\delta_{\text{Pilar}} - \delta_{\text{parede}}$

Variação do assentamento diferencial entre parede e pilar 2D : $(\delta_{\text{Pilar}} - \delta_{\text{parede}}) / \delta_{\text{pilar}}$

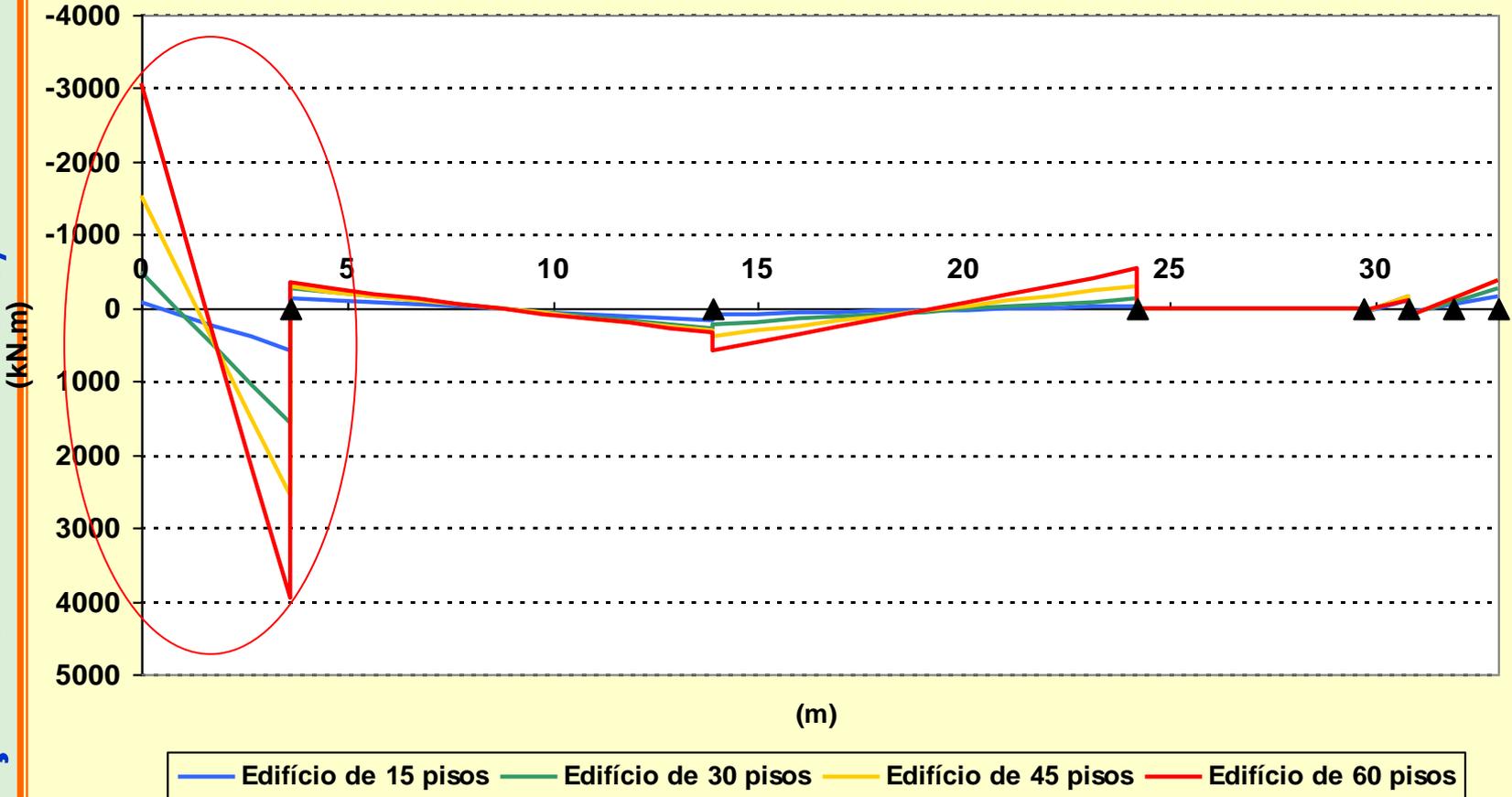
Os assentamentos são aproximadamente proporcionais ao nº de pisos.
A variação % diminui devido à contribuição da estrutura



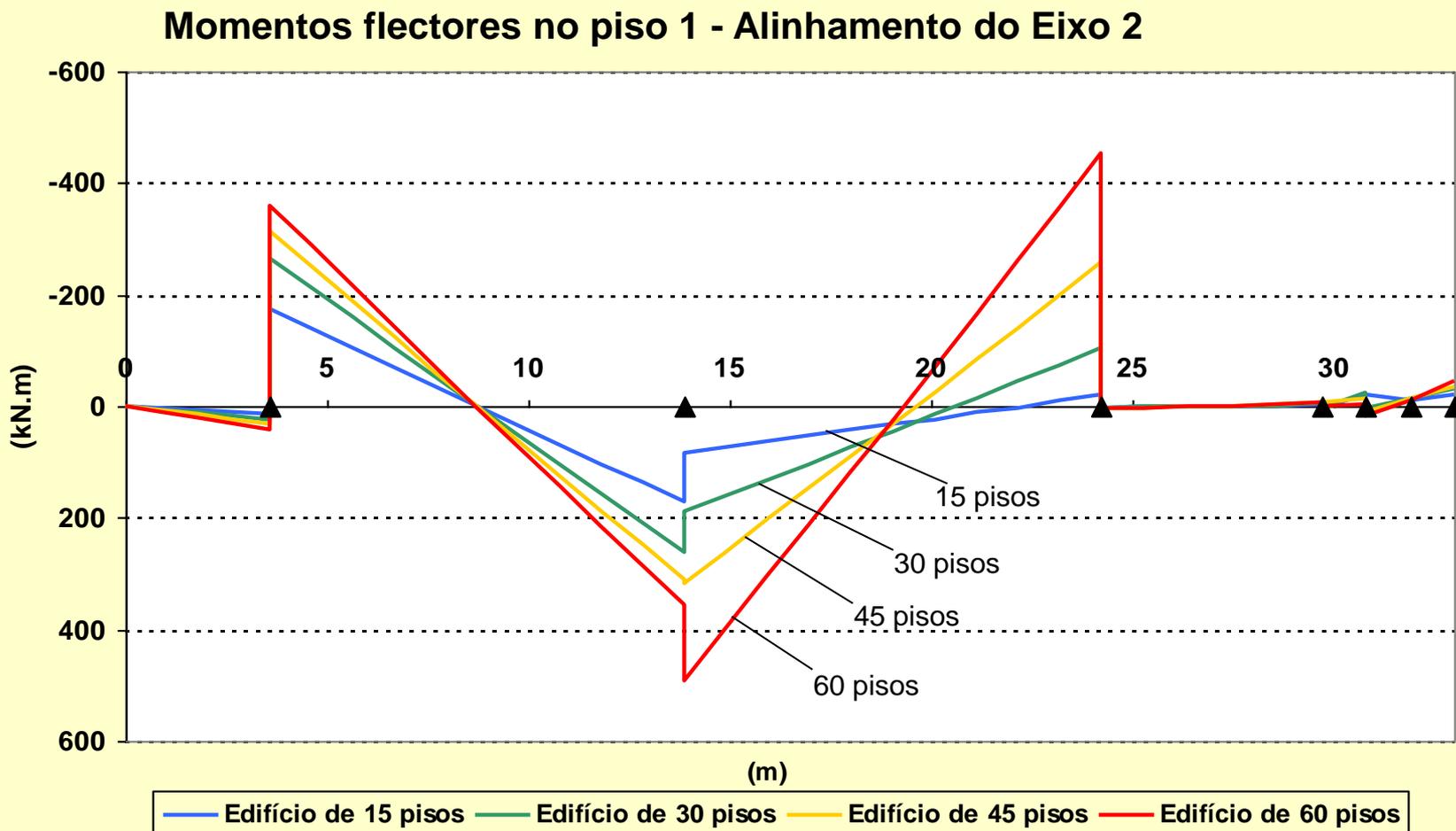
Os assentamentos diferenciais decrescem em altura

Assentamentos de apoio
Momentos flectores por assentamentos no piso -4

Momentos flectores no piso -4 - Alinhamento do Eixo 2

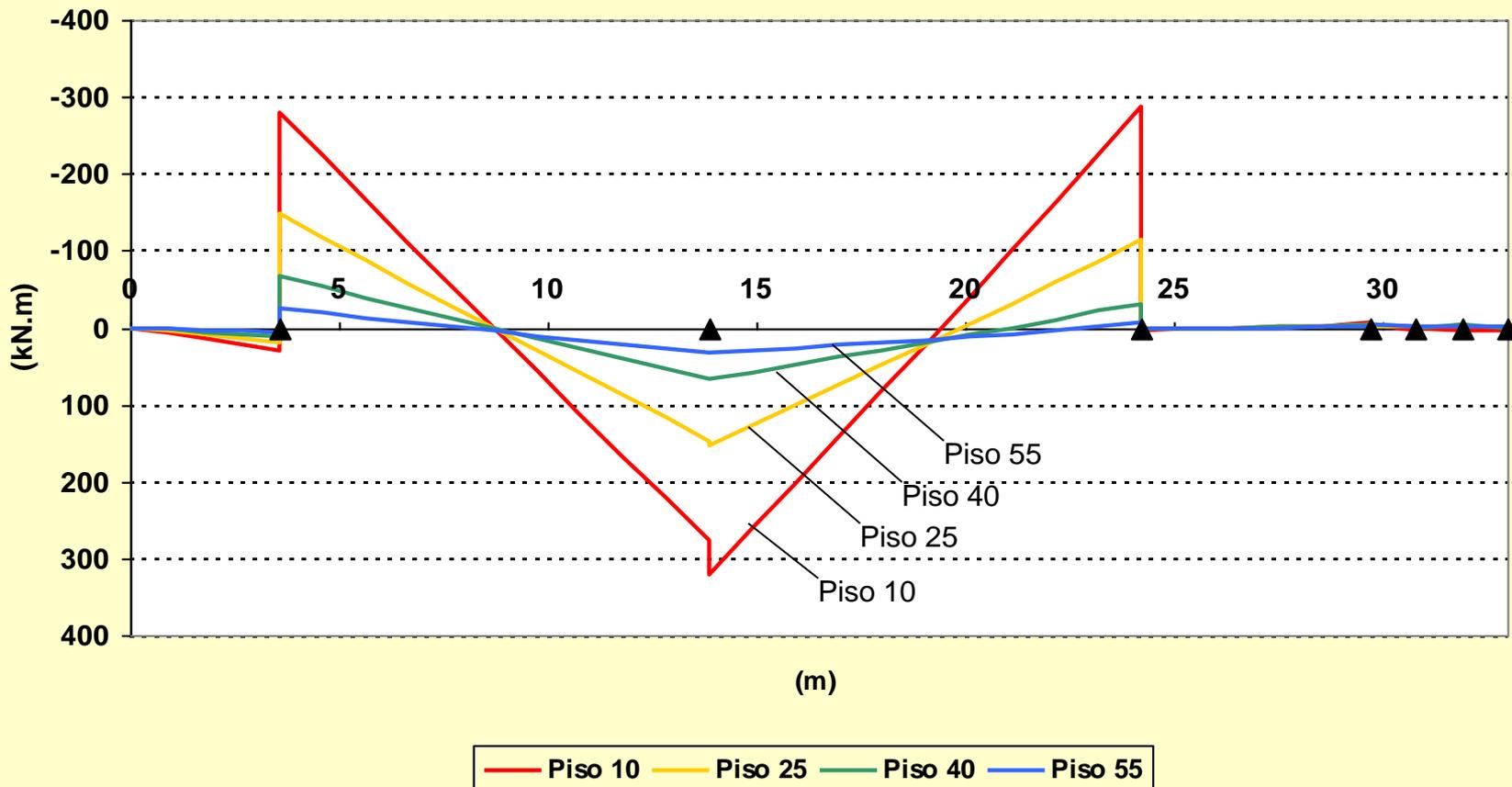


O momento flector é maior no troço entre a parede de contenção e o pilar 2/D (assentamento diferencial elevado associado ao vão reduzido)



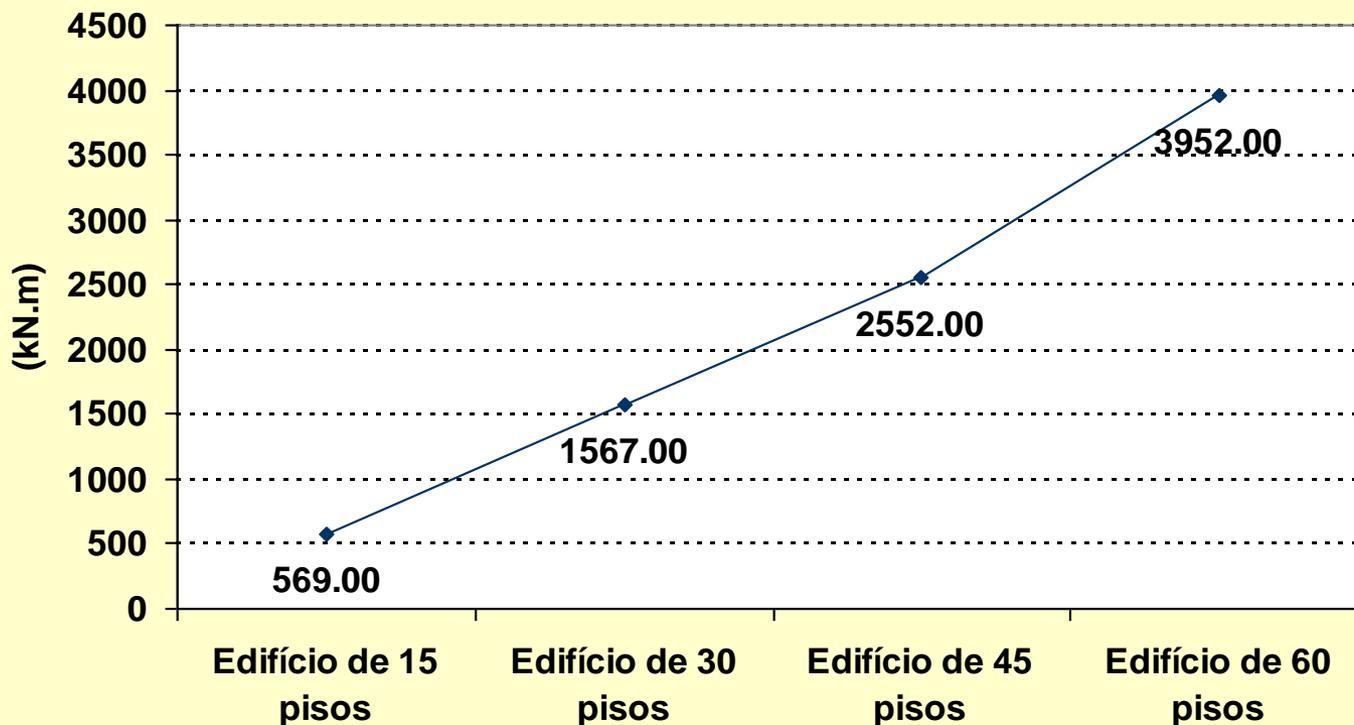
Esforços máximos da viga entre os eixos B e D (o assentamento é maior no pilar 2/C)

Momentos flectores no Edifício de 60 pisos - Alinhamento do Eixo 2



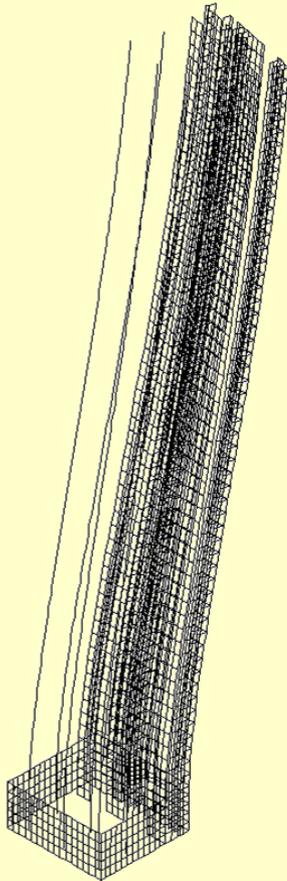
O valor dos esforços originados por assentamentos de apoio decresce rapidamente em altura

Momentos flectores máximos devido a Δd entre parede e pilar nos eixos 2/D no piso -4



Os assentamentos são quase proporcionais ao nº de pisos mas em termos de variação % diminui devido às maiores deformações nos pilares

Comportamento Estrutural – Acção do Vento

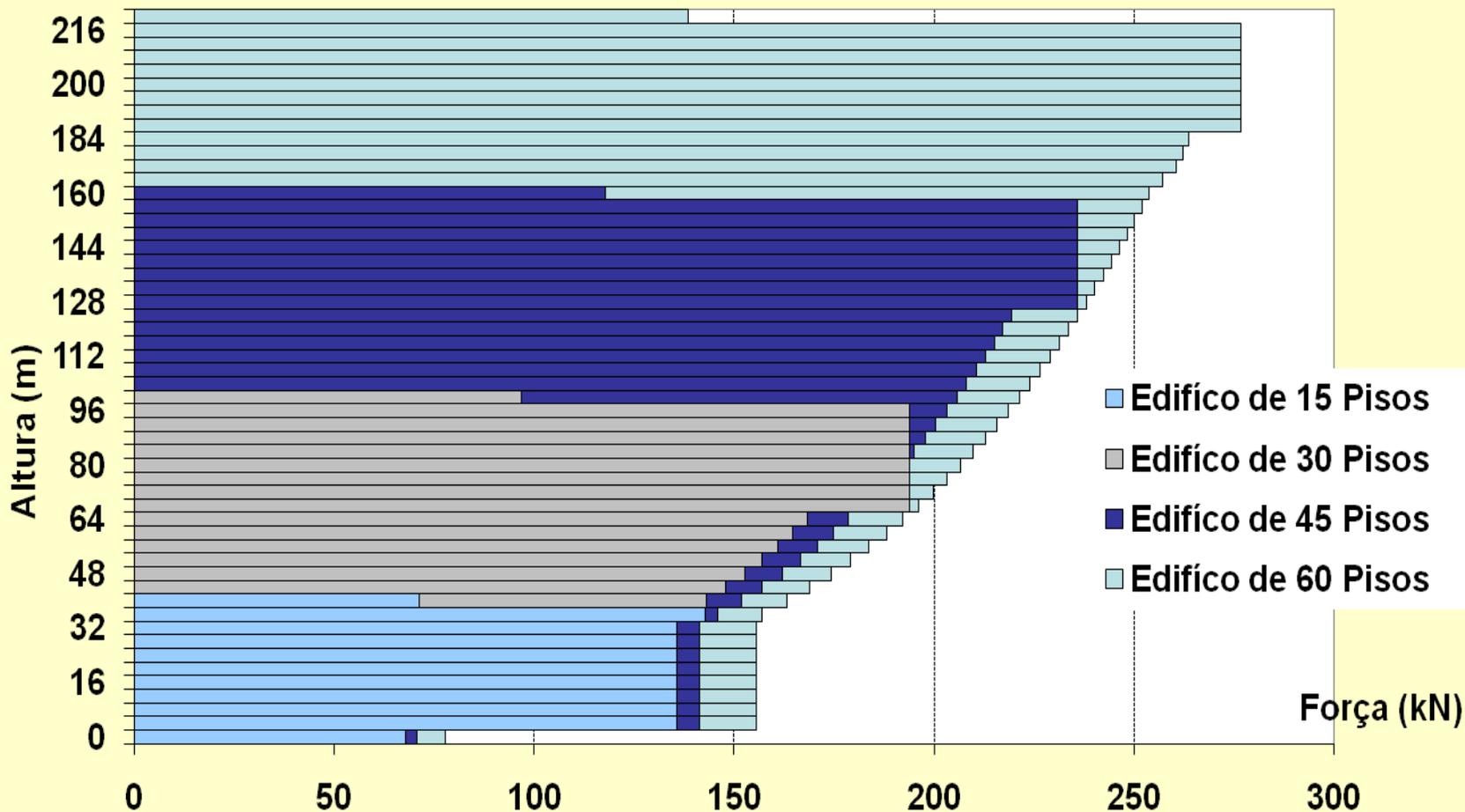


- A acção do vento é a principal acção horizontal a considerar neste estudo (as acções sísmicas são tratadas noutra comunicação):
 - Velocidade do vento crescente em altura
 - Momento na base (piso -1) directamente dependente da distância a cada piso
 - (Considerado o edifício em zona de baixa sismicidade)
- A estrutura está sujeita fenómenos de ressonância e amplificação dinâmica:
 - Estrutura flexível: rácio elevado de altura/área
 - Frequência fundamental baixa
 - Frequências próprias da estrutura próximas das do vento
- Deve ser verificada a acção do vento em E.L.Últimos e de Utilização:
 - Como acção variável base e de combinação (condicionante)
 - Acelerações máximas e nível de conforto associado

A acção do vento deve ser tida em conta na verificação da segurança estrutural mas também no conforto dos utilizadores

Acção do Vento Forças equivalentes

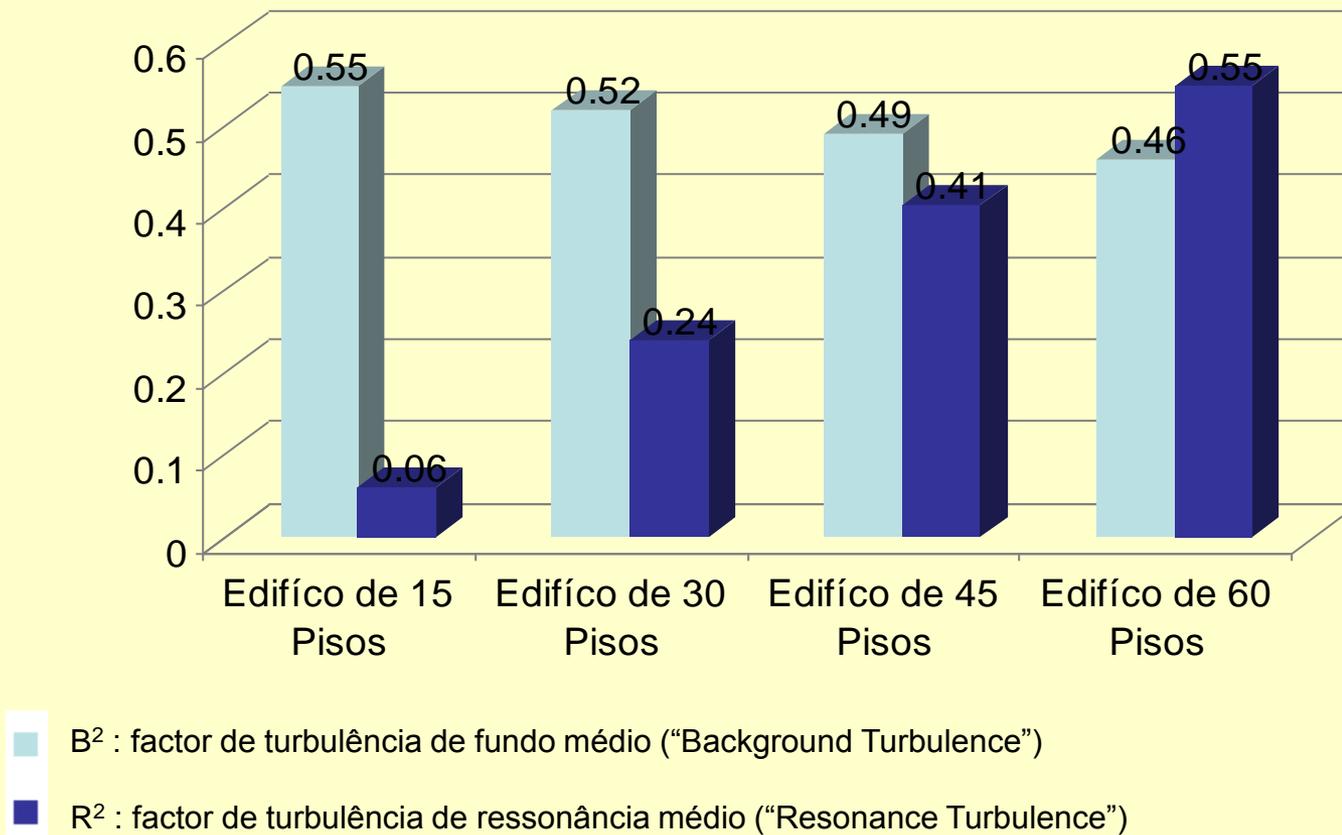
Forças equivalentes ($F_{w,e}$) segundo o EC1 parte 1-4



As forças correspondentes à acção do vento para o mesmo piso aumentam com a altura total do edifício.

Acção do Vento Factores de turbulência

Factores de turbulência, B^2 e R^2



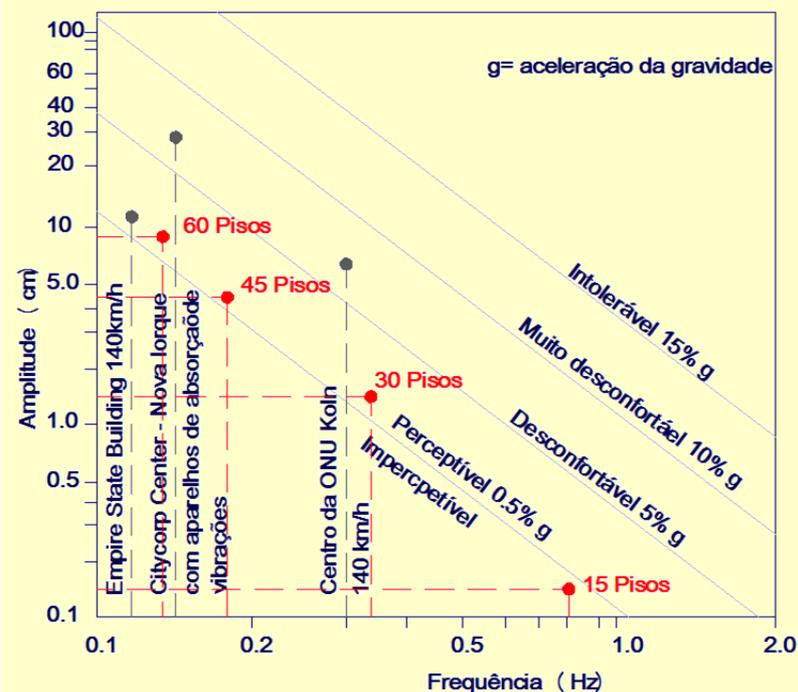
O factor de ressonância, quase nulo para o edifício de 15 pisos, aumenta significativamente para os edifícios mais altos

Acção do vento

Estados Limites de utilização – Conforto face a vibrações

- Procedeu-se à análise dinâmica tendo em consideração:
 - Dimensões do edifício e cargas gravíticas
 - Frequências própria da estrutura
 - Velocidade base do vento: 26m/s
 - Localização: meio urbano
 - Amortecimento crítico: 1.5%
- Conforto dos utilizadores dependente das acelerações sentidas, função da velocidade do vento e amplificação dinâmica:
 - Aceleração na direcção do vento
 - Aceleração na direcção transversal

Curvas de conforto do CEB 1991



Para os edifícios com 30 pisos ou mais as vibrações devido ao vento já são perceptíveis embora dentro dos limites de conforto

**Os edifícios de grande altura
recomendam a adopção de análises que
tenham em consideração o
comportamento dos diferentes órgãos e
a sua entrada em serviço**