



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

# O COMPORTAMENTO SÍSMICO DOS EDIFÍCIOS POMBALINOS. PROPOSTAS DE REFORÇO

Reforço Estrutural de Edifícios Antigos

Rita BENTO e Mário LOPES

IST, Lisboa, Março 2007



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

1. DESCRIÇÃO

2. MODELAÇÃO DE UM EDIFÍCIO

3. MODELAÇÃO DE UM QUARTEIRÃO

4. ANÁLISE DE UM EDIFÍCIO

5. REFORÇO

6. ALTERAÇÕES

## Descrição

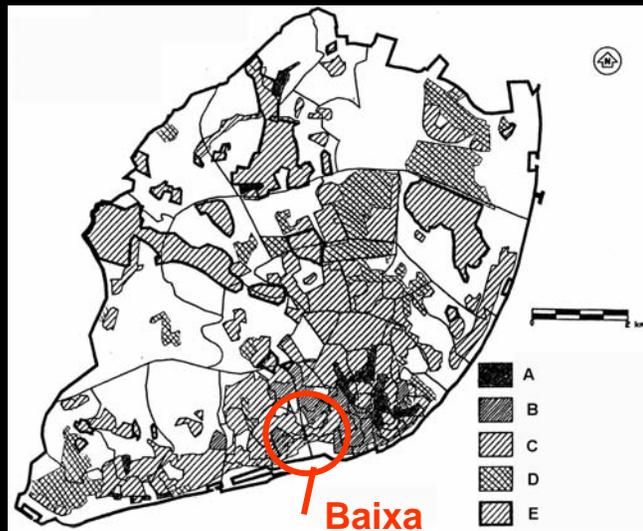
Os edifícios de alvenaria constituem uma percentagem importante do parque edificado da cidade de Lisboa.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Descrição



LEGENDA:

A - EDIFÍCIOS DE ALVENARIA (<1755)

B - EDIFÍCIOS POMBALINOS E SEMELHANTES (1755 a 1880)

C - EDIFÍCIOS ALTOS DE ALVENARIA COM PAVIMENTOS DE MADEIRA OU DE BETÃO E PAREDES RESISTENTES DE ALVENARIA (1880 a 1940)

D - EDIFÍCIOS DE ALVENARIA, COM PAVIMENTOS EM BETÃO OU COM ESTRUTURA PORTICADA DE BETÃO (1940 a 1960)

E - EDIFÍCIOS RECENTES DE BETÃO ARMADO (>1960)

Dentro dos edifícios  
construídos após 1755,  
podem-se distinguir três  
fases distintas:

- Pombalinos
- Gaioleiros
- De Placa



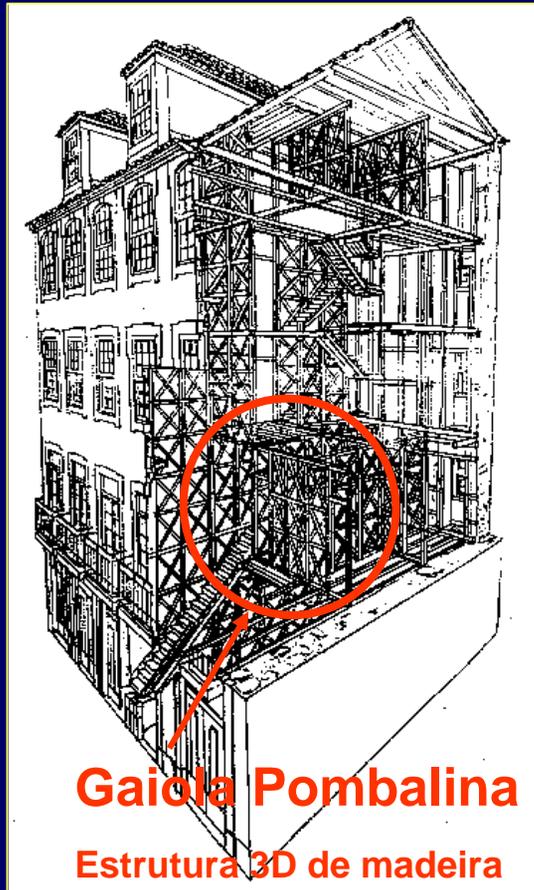
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Descrição

## Edifícios Pombalinos

(1755 a 1880)

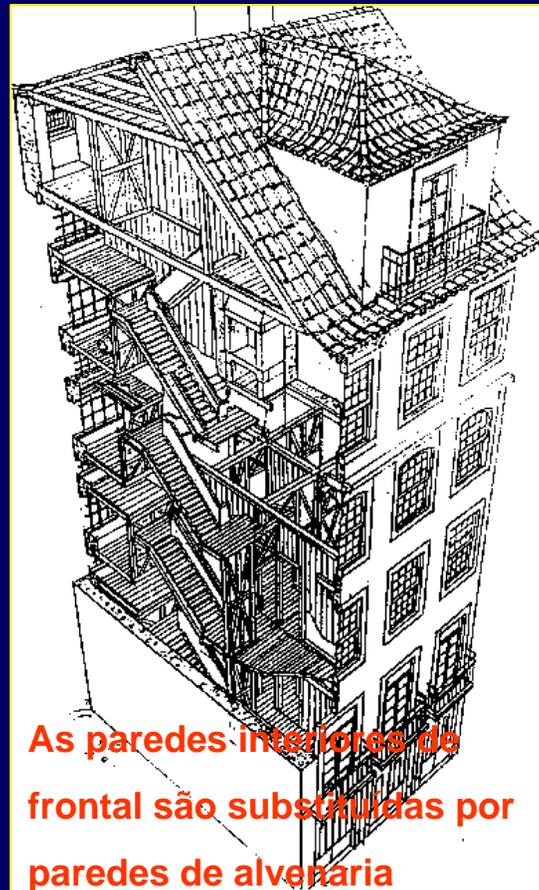


**Gaiola Pombalina**

Estrutura 3D de madeira

## Edifícios Gaioleiros

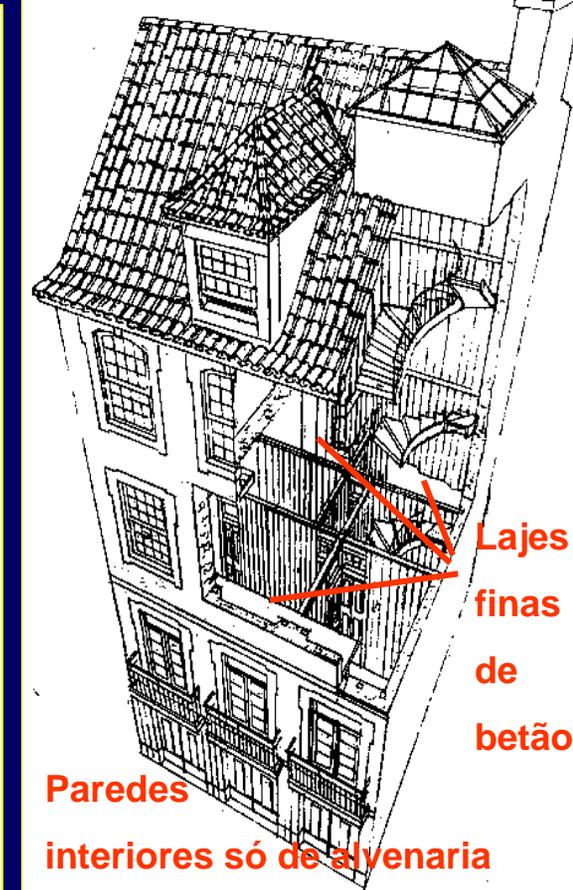
(1880 a 1940)



As paredes interiores de  
frontal são substituídas por  
paredes de alvenaria

## Edifícios de 'Placa'

(1940 a 1960)



Paredes  
interiores só de alvenaria

Lajes  
finas  
de  
betão

Alteração de rigidez, resistência e ductilidade

# Edifício Pombalino Tipo

Número máximo de pisos: 3



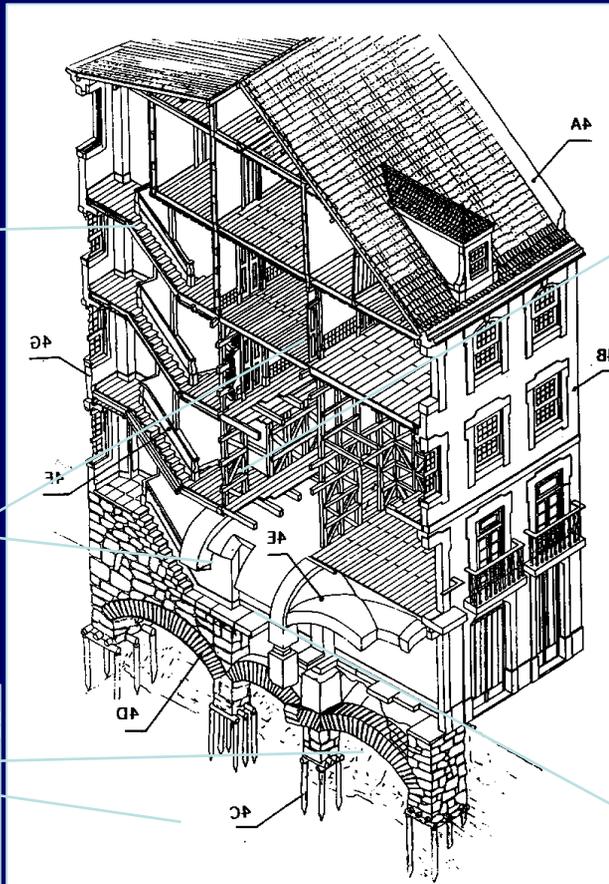
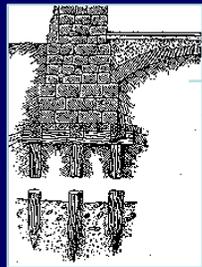
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Descrição

águas  
furtadas

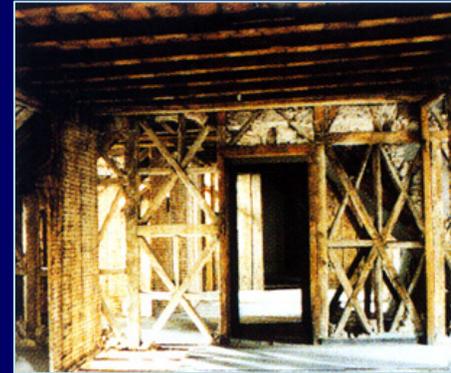
pavimentos  
de madeira



Fundações indirectas  
através de estacas  
curtas de pequeno  
diâmetro

Abóbadas de  
alvenaria de  
blocos cerâmicos  
e arcos de pedra

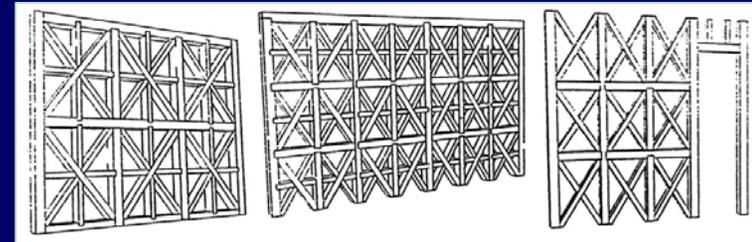
## Disposições anti-sísmicas



paredes  
interiores  
de frontal

Cruzes de Santo André

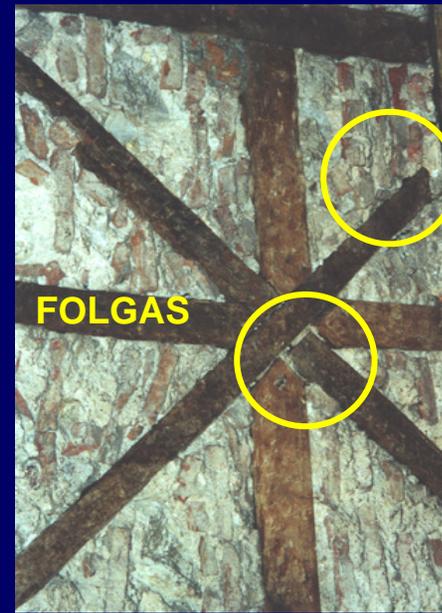
com várias geometrias possíveis



## Modelação Frontal

Os resultados numéricos são próximos da rigidez experimental caso se removam as diagonais traccionadas.

**Resultado realista** se se considerarem as ligações observadas em edifícios antigos e as técnicas construtivas usuais da época



Consegue-se uma melhor aproximação dos resultados experimentais se não se considerar a existência de alvenaria



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Modelação  
Edifício

# Modelação Frontal

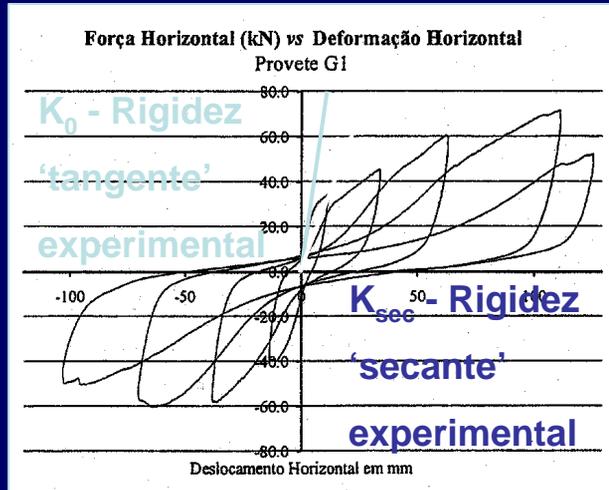
## Validação do modelo - Comparação dos resultados experimentais de um painel ensaiado com os resultados do modelo numérico



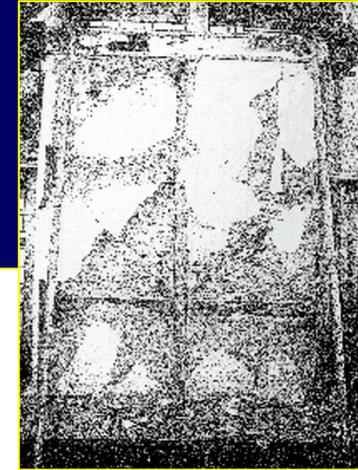
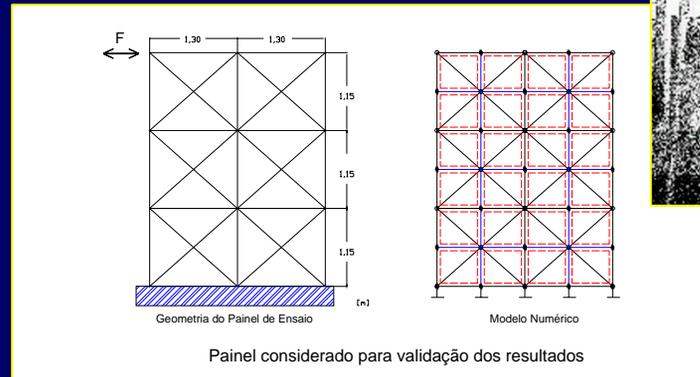
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

DECivil

Modelação Edifício



Resultados Experimentais  
Provete 1 [Ramos, 2000]



Painel ensaiado  
[Ramos *et al*, 2001]

Modelo do painel

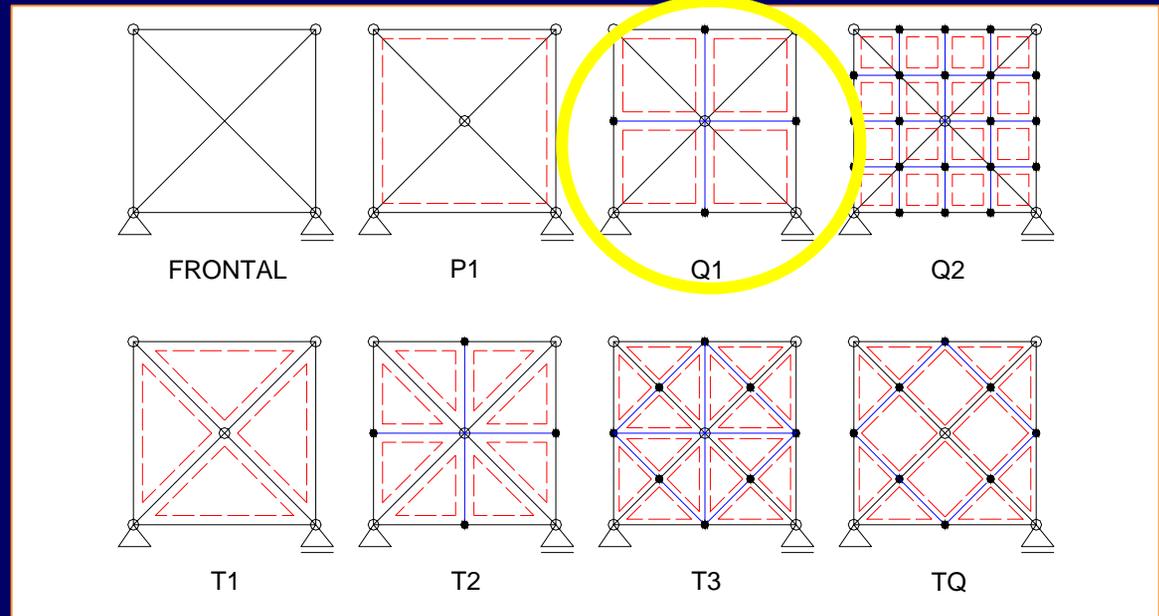
Calibração do modelo: Rigidez numérica  $K$  semelhante à rigidez 'tangente' experimental  $K_0$

**Rigidez numérica demasiado elevada**

# Modelação Frontal

Escolha da malha  
de elementos  
finitos a utilizar no  
modelo global do  
edifício

ELEMENTOS DE FRONTAL: Malhas estudadas (elementos *shell*)



Escolha  
da malha

Quando as diferenças nos  
resultados deixam de ser  
significativas  
(Convergência)

**Análise de  
sensibilidade a  
 $E e \nu$   
da alvenaria**



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

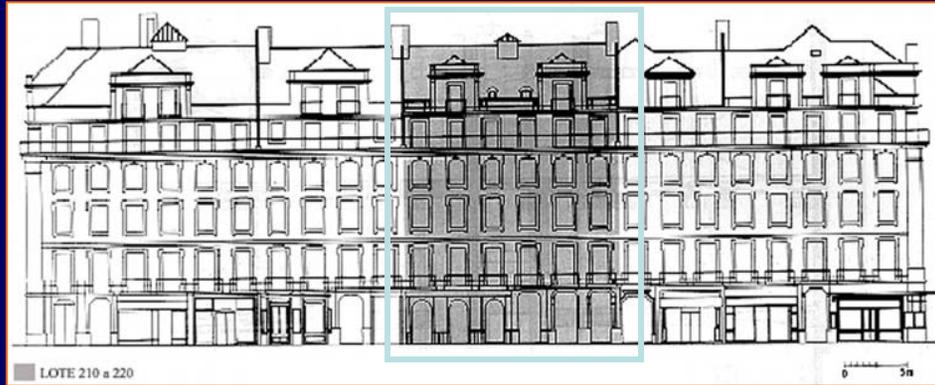
DECivil

Modelação  
Edifício



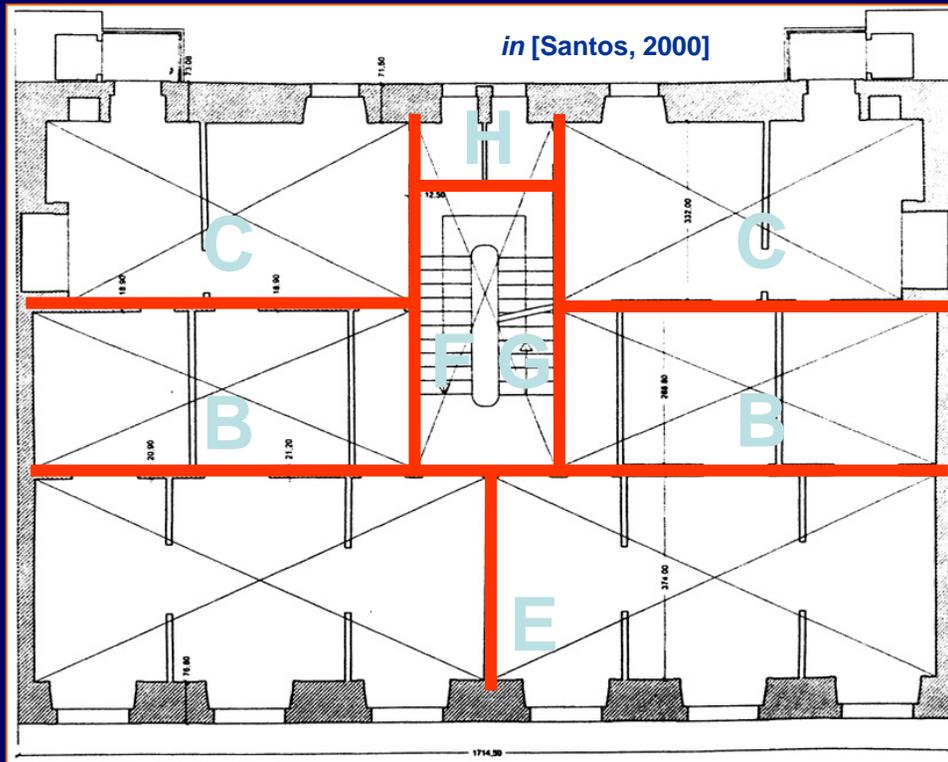
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil



## Edifício-exemplo

Rua da Prata, 210 a 212



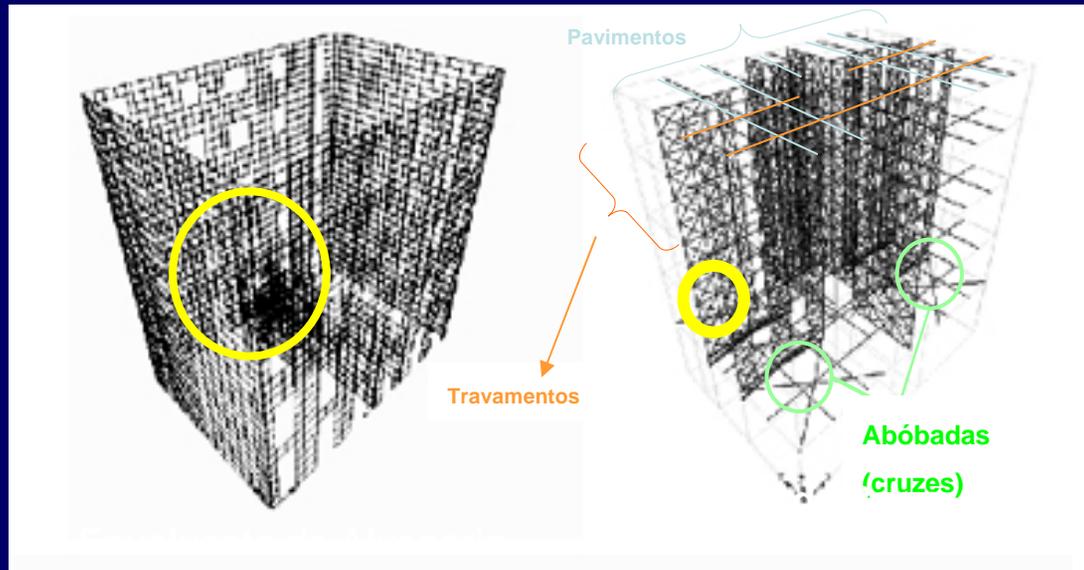
Modelação  
Edifício

# Modelo Numérico – SAP 2000®

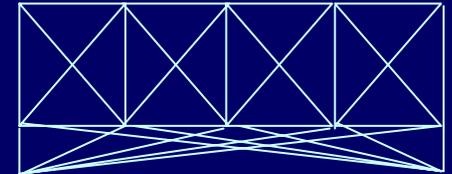


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil



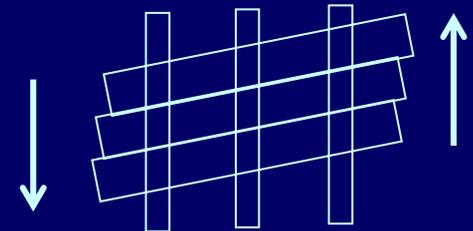
## Piso Térreo



Arcos: Treliça

Abóbadas: Cruzes

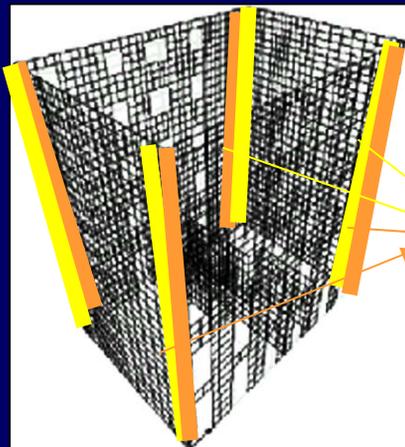
## Pavimentos



Piso deformável

## Paredes de Alvenaria

Elementos 2D - shell



Alvenaria de  
pior qualidade

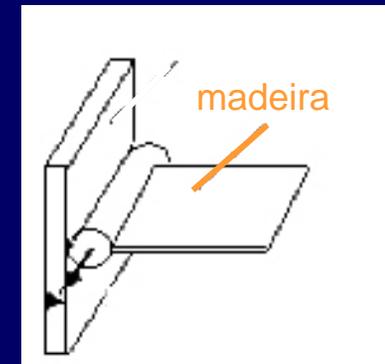
## Paredes de Frontal

Elementos de barra bi-  
articulados

## Ligações

madeira / alvenaria

Rotações permitidas



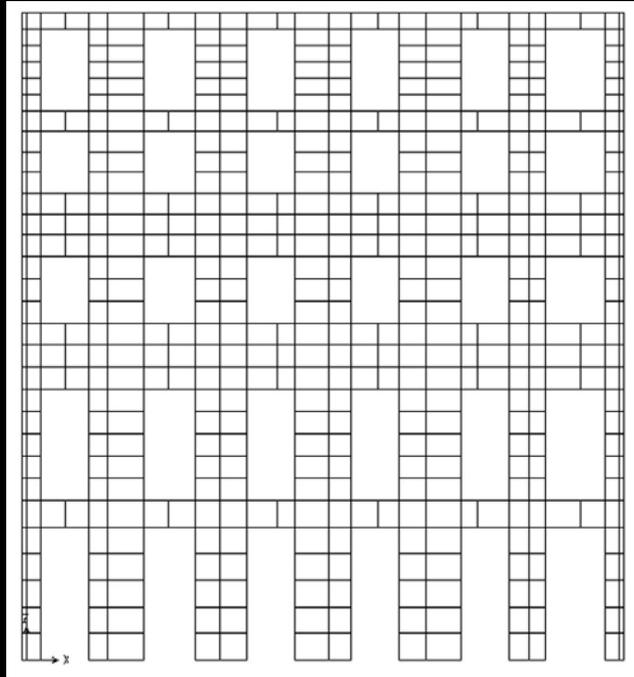
# Modelo Numérico – SAP 2000®



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

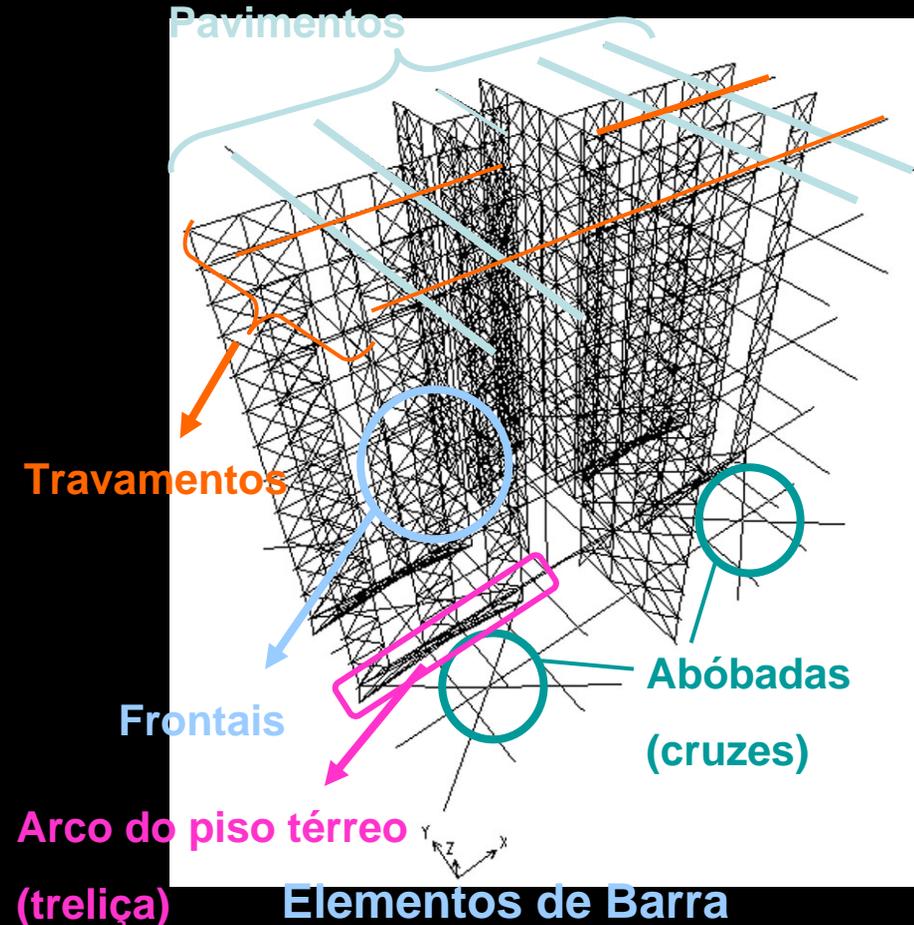
DECivil

Modelação  
Edifício



Fachada da frente

Elementos finitos 2D (*shell*)



Arco do piso térreo  
(*treliça*)

Elementos de Barra

Viabilidade em Projecto: Programa de Cálculo Comercial (SAP2000®)

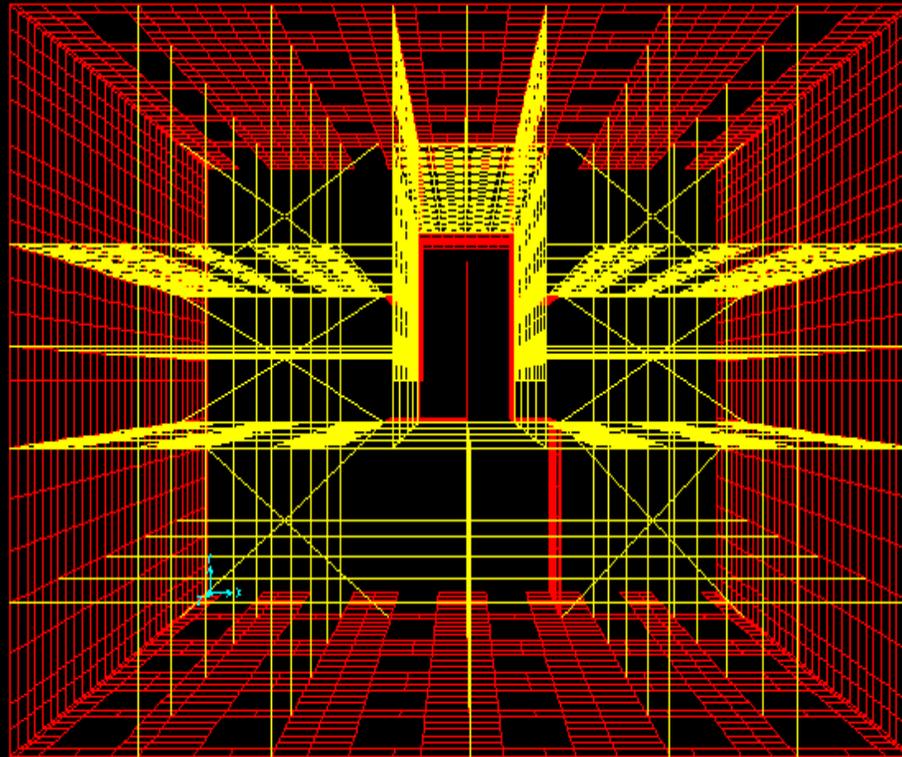
## Comportamento Dinâmico da Estrutura Original



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Modelação  
Edifício



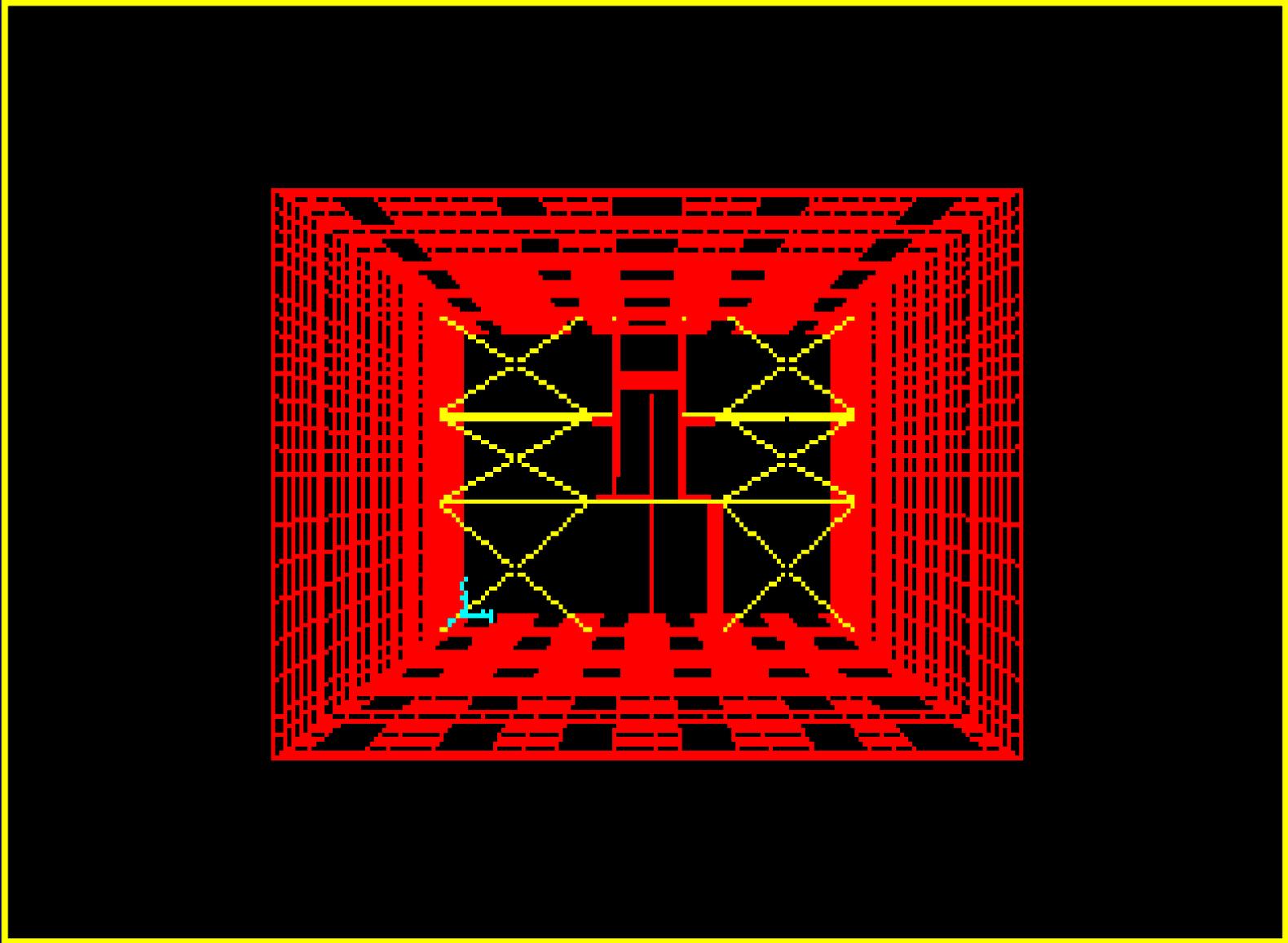
**Edifício com gaiola**  
(SAP2000®)



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

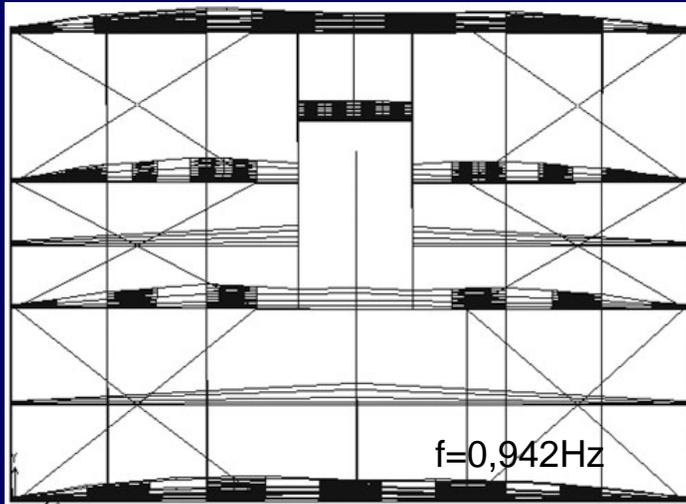
Modelação  
Edifício



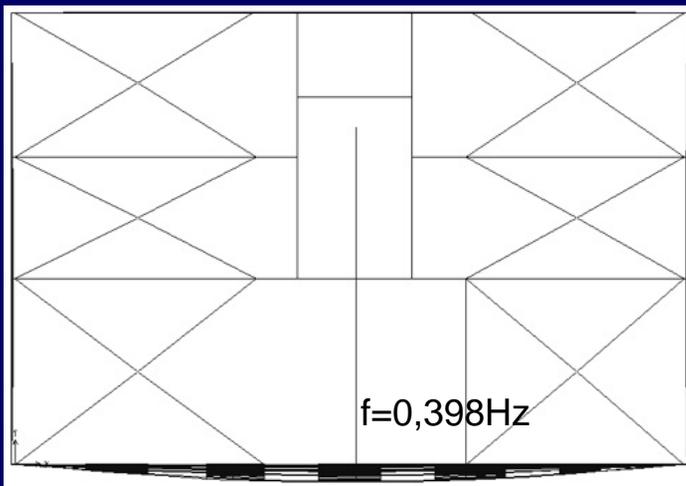
Edifício sem gaiola (SAP2000®)

# Influência da Gaiola: Confere Rigidez

## 1º Modo de Vibração com gaiola (f=0,942 Hz)

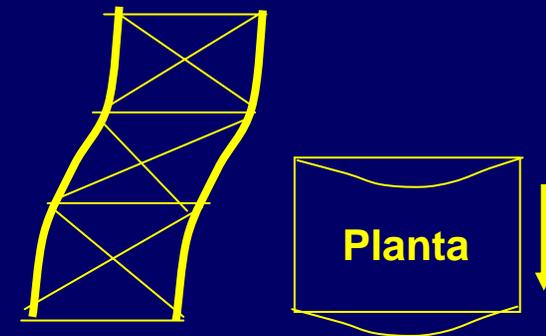


## sem gaiola (f=0,398 Hz)



Impede o aparecimento de modos de vibração locais

Com a gaiola,  
as paredes de  
alvenaria  
vibram em  
conjunto.



Corte Lateral

Sem a gaiola,  
as paredes de  
alvenaria vibram  
independentemente  
umas das outras.



Modos locais



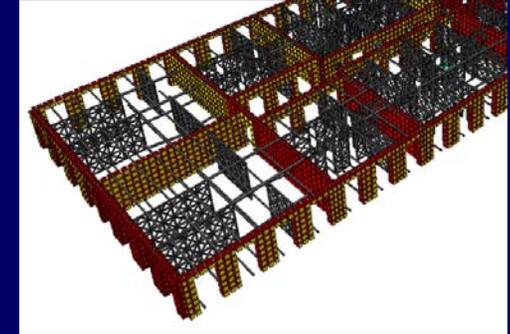
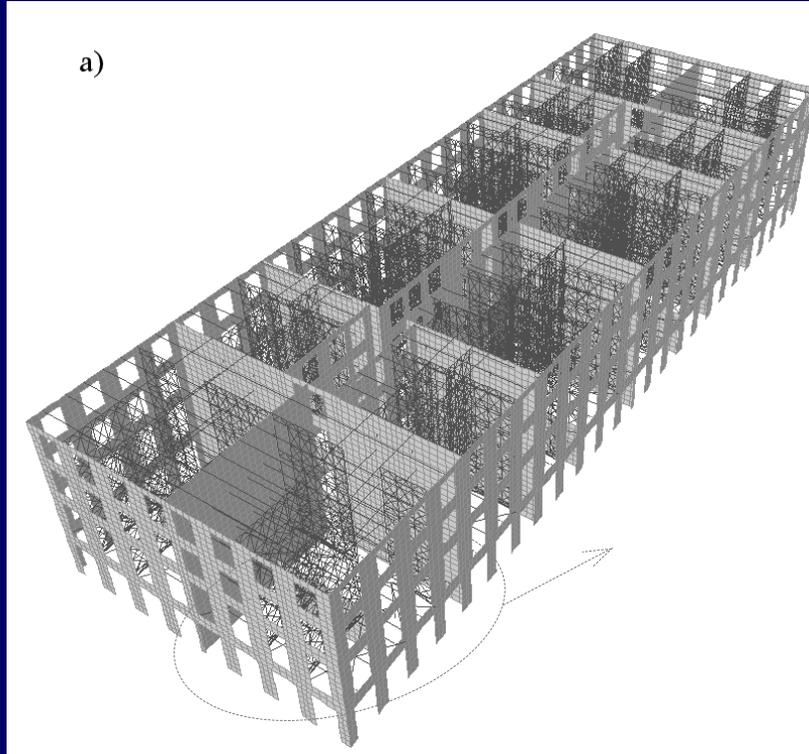
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

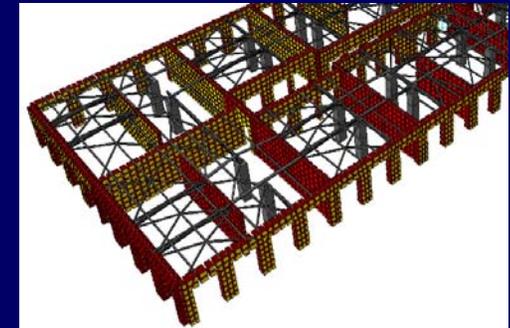
Modelação  
Edifício

# Quarteirão Pombalino

Criação do modelo tridimensional:



Pormenor de um piso corrente



Pormenor do piso térreo

- 175 000 graus de liberdade;
- Massa concentrada nos nós e nas paredes alvenaria;
- Barrotes dos pisos como barras bi-articuladas;
- Elementos dos frontais bi-articulados no seu plano;
- Fundações: encastramentos;
- Acções e propriedades mecânicas com valores médios.



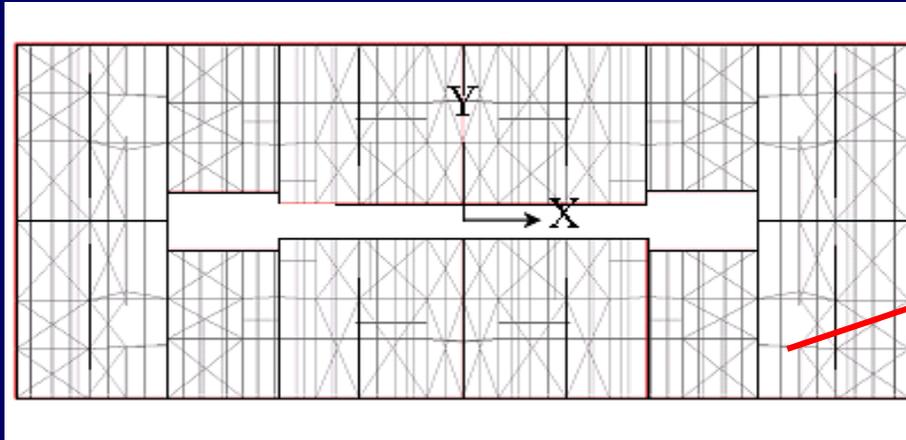
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

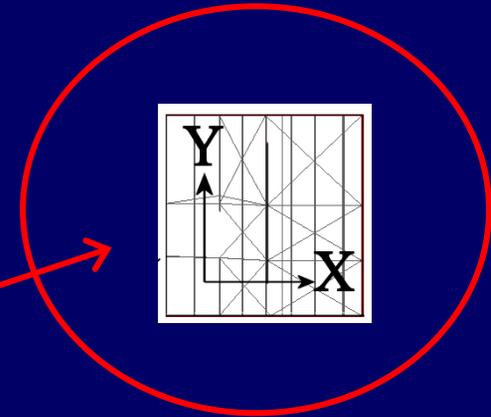
Modelação  
Quarteirão

# Frequências e Modos de Vibração

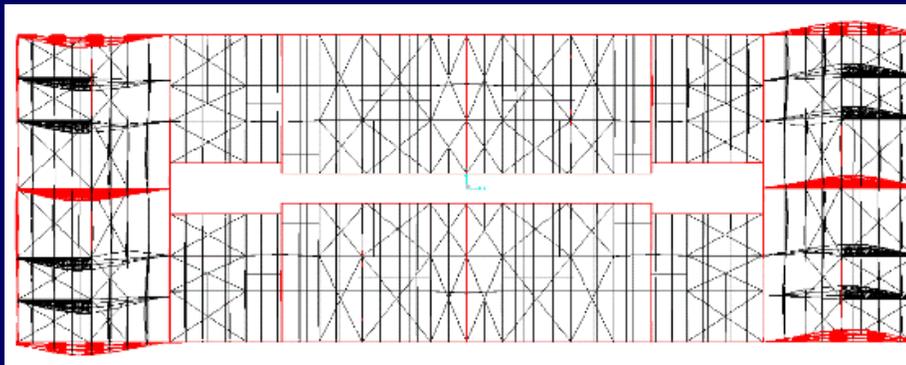
Quarteirão vs edifício isolado:



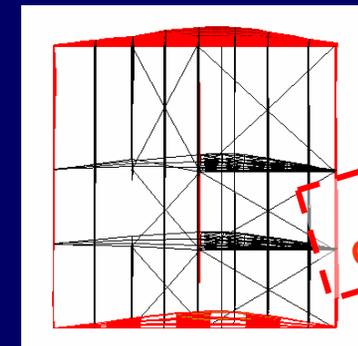
Modelo global do quarteirão



Modelo de edifício de gaveto isolado



1.58Hz – 1º modo translação



1.25Hz – 1º modo translação

EFEITO QUARTEIRÃO



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Modelação  
Quarteirão

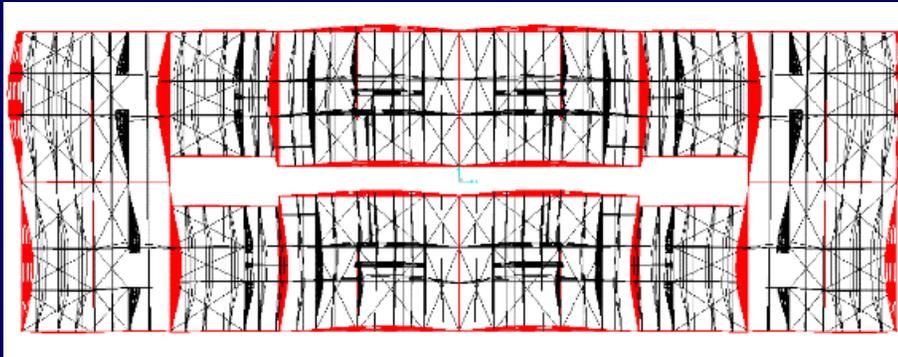


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

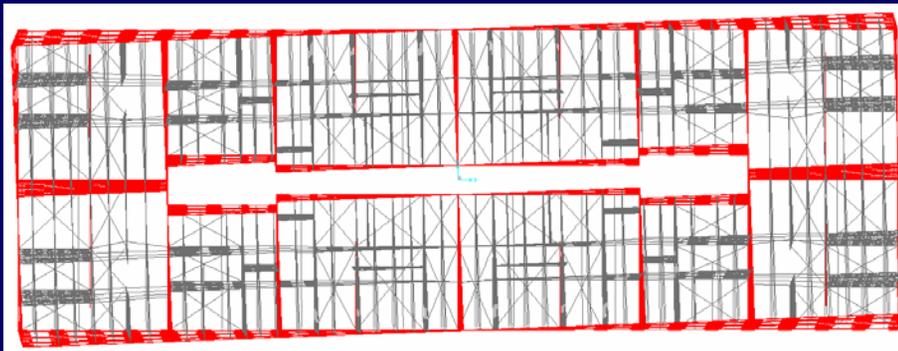
DECivil

Modelação  
Quarteirão

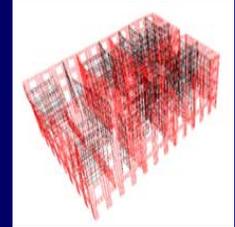
## Influência da deformabilidade do piso na resposta da estrutura:



Sem piso rígido (real?)



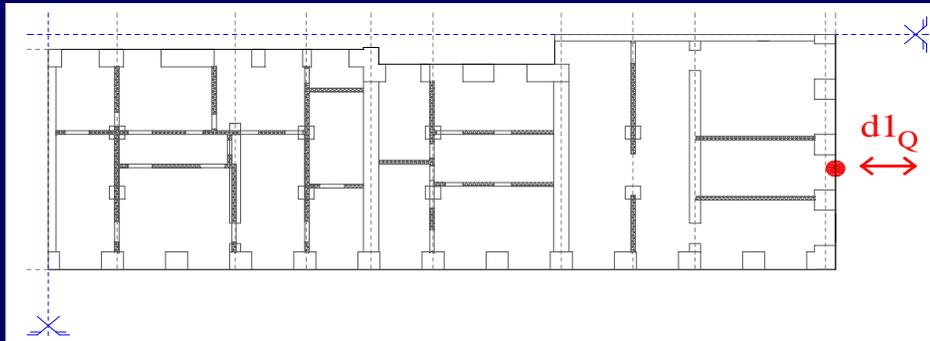
Com piso rígido (irreal)



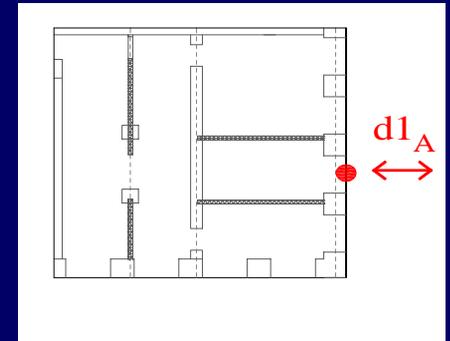
Rigidez axial  
*versus*  
Piso rígido

COMPORTAMENTO  
QUARTEIRÃO ?

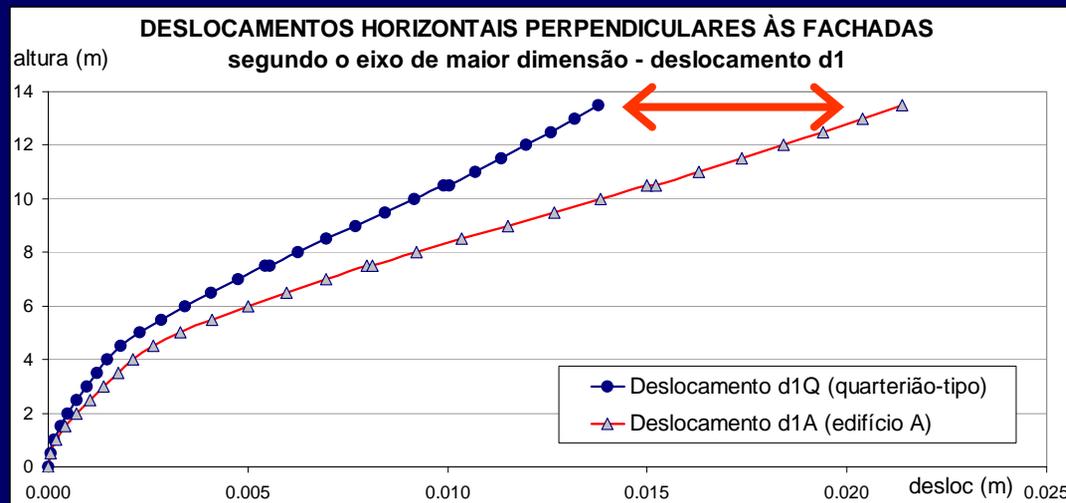
## Efeito de conjunto vs comportamento de edifício isolado:



Deslocamento fachada quarteirão



Deslocamento fachada edifício isolado



Comparação deslocamentos

**EFEITO  
QUARTEIRÃO**



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Modelação  
Quarteirão

# Mecanismo de Colapso



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Esforços de Dimensionamento:

$$F_{sd} = F_{CQP} \pm \gamma_{sis} F_E$$

Definição de Danos:  $F_{sd} \geq F_{Rd}$

Rotura de

Ligações elementos  
Estruturais

Aumento de  $\gamma_{sis}$ :  
Evolução de Danos até  
ao COLAPSO

$$\gamma_{sis}^{max}$$

Intensidade  
Máxima da Acção  
Sísmica

$$\gamma_{sis}^{max}$$

Quantifica a resistência sísmica da estrutura

Permite comparar soluções diferentes

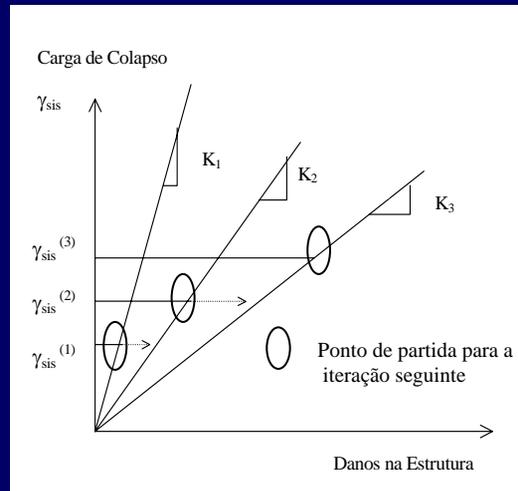
Resultados

## Fontes de Não Linearidade

- Roturas localizadas (fendilhação da alvenaria)
- Comportamento das ligações (rotura frágil)
- Comportamento não linear da alvenaria

### Análise Não Linear

#### Processo Iterativo



#### Em cada iteração:

- . Análise linear
- . A estrutura a analisar resulta da estrutura analisada na iteração anterior, após a remoção das ligações em rotura



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Resultados

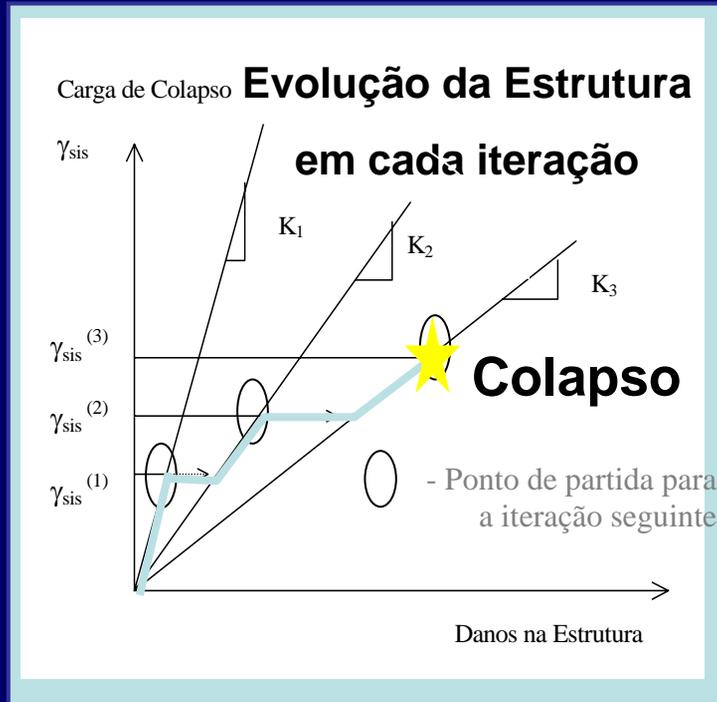
# Mecanismo de Colapso



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

## Cálculo iterativo



[Cardoso, 2002]

## Em cada iteração:

- Análise linear elástica tridimensional.
- Análise dinâmica por espectro de resposta.
- A estrutura a analisar resulta da estrutura analisada na iteração anterior, após a remoção das ligações em rotura.

## Viabilidade em Projecto

Resultados

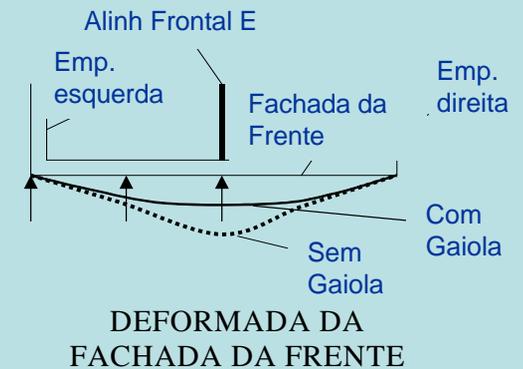
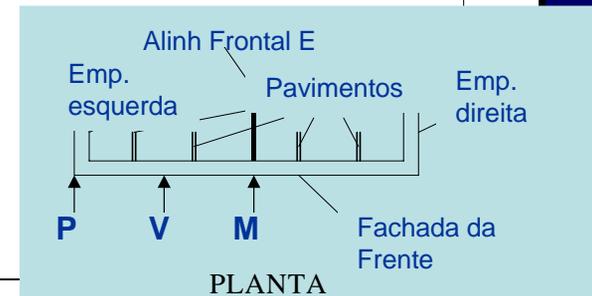
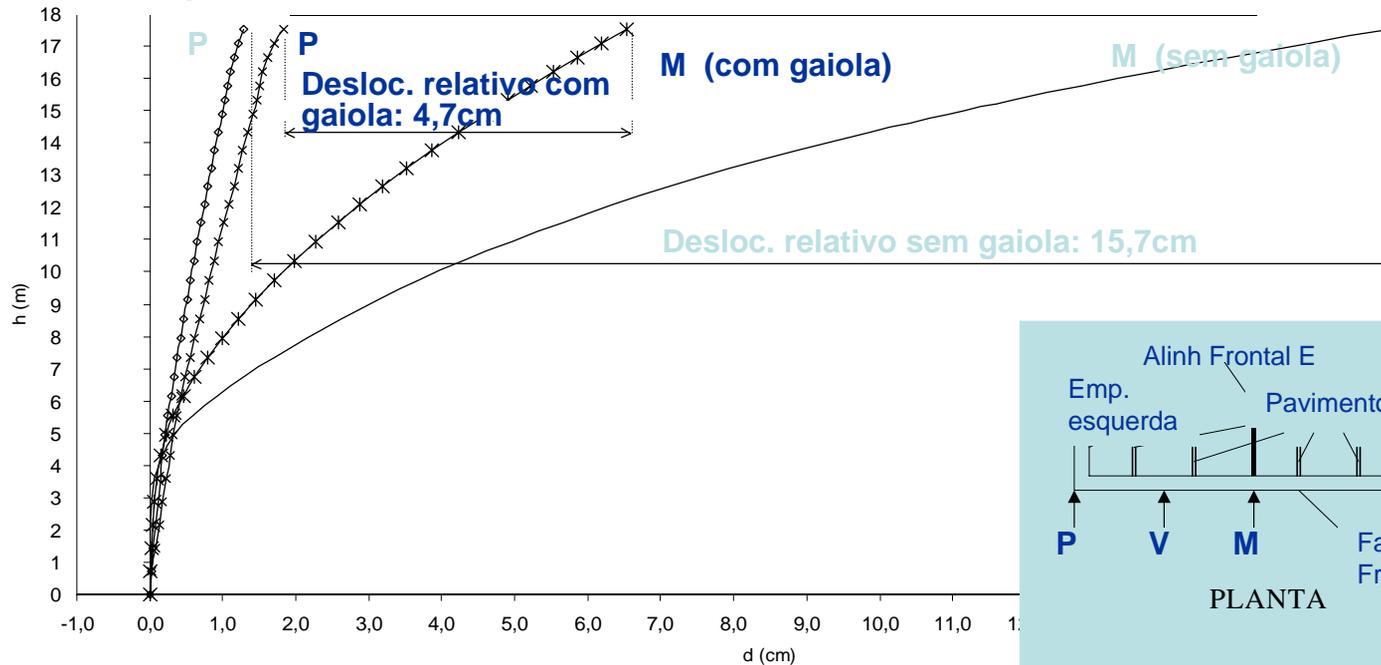


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Resultados

### Evolução dos deslocamentos na fachada para fora do seu plano



Devido à presença da Gaiola, os deslocamentos da fachada da frente reduzem-se cerca de **70%**

# Mecanismo de Colapso

1ª Iteração  $\gamma_{sis}=0,25$

2ª Iteração  $\gamma_{sis}=0,25$

3ª Iteração  $\gamma_{sis}=0,25$

$$\gamma_{sis}^{m\acute{a}x} = 0,25$$

Sismo de 9 de Julho de 1988

Fotografias tiradas na Horta -

Açores, 2001

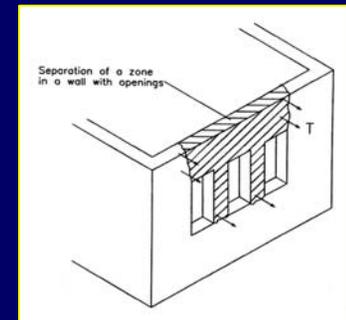


## COLAPSO:

Destacamento da fachada e queda da cobertura

• **Efeito *dominó***: rotura sequencial das ligações

• Rotura das ligações dos pavimentos e dos elementos de frontal perpendiculares à fachada da frente para o 4º e 5º Pisos



[Crossi, 1988]



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Resultados

# Vulnerabilidade sísmica

Cálculo de danos para intensidades crescentes da acção sísmica

$$F_{sd} = F_{CQP} \pm \gamma_{sis} F_E$$



$$\gamma_{sis}^{m\acute{a}x}$$

Intensidade da  
Acção Sísmica  
de **COLAPSO**

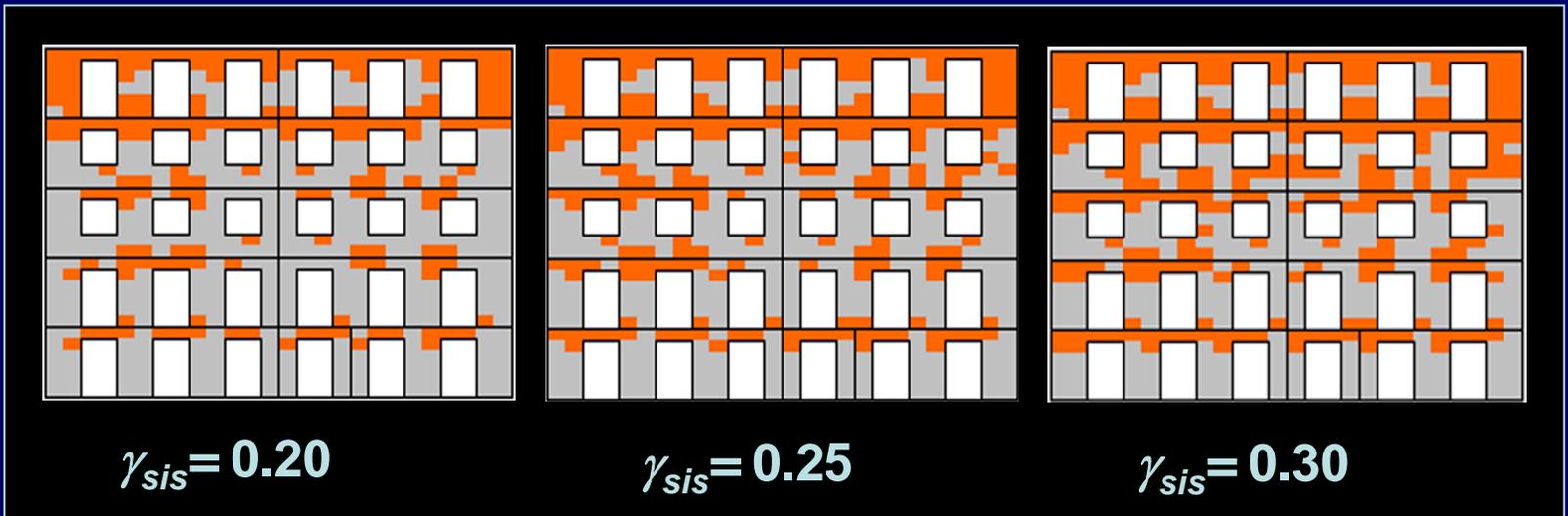


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Resultados

Mapas de danos na alvenaria: Fachada da Frente



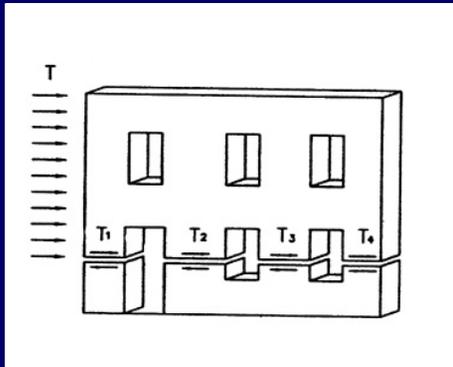
Danos na alvenaria devido a tracção – Fachada da frente

## Mecanismo de Corte na Base

$$\gamma_{sis}^{m\acute{a}x} = 0,70$$

### COLAPSO GLOBAL:

Rotura por corte da totalidade dos elementos verticais da fachada da frente no piso térreo, excepto os elementos de canto



## Influência da resistência da alvenaria na ligação fachada-empena

$$\gamma_{sis}^{m\acute{a}x} = 0,35$$

**Mecanismo de Colapso** idêntico ao observado para o edifício-exemplo



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Resultados

# Solução de Reforço

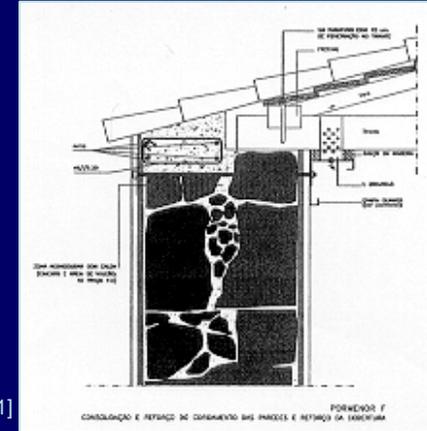


INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

DECivil

## REFORÇO:

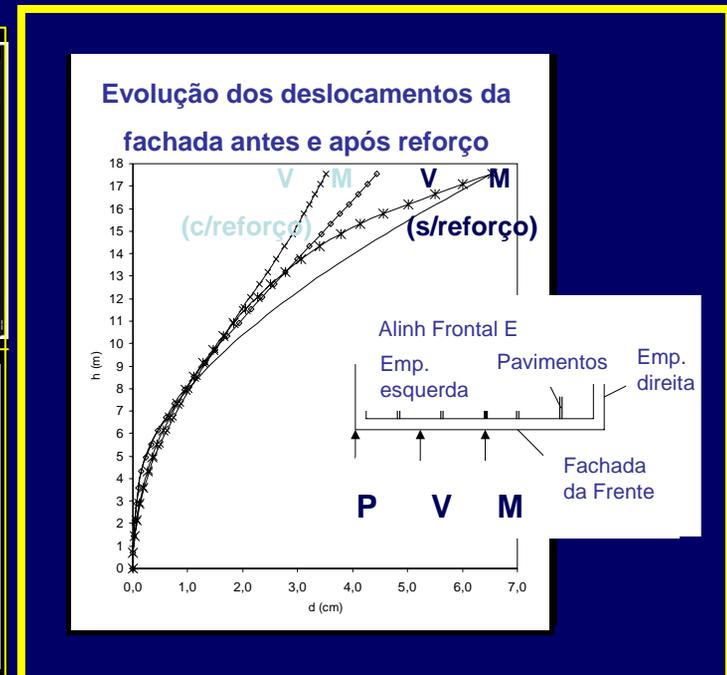
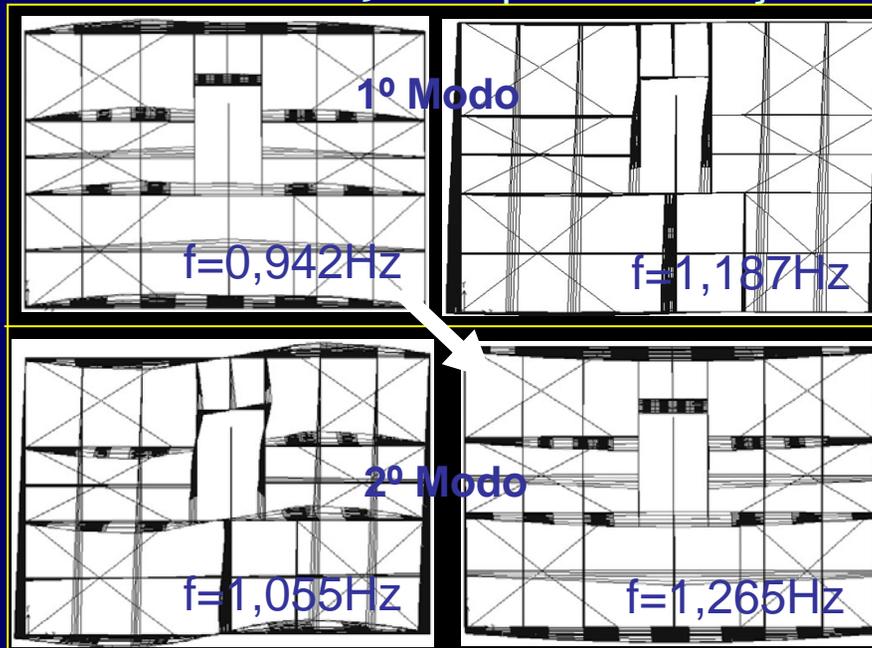
Viga de BA (0,6mx0,25m) construída no topo do edifício, ao longo de todo o perímetro exterior



[Costa e Vasconcelos, 2001]

## Aumento da rigidez da fachada a movimentos para fora do plano

Antes do Reforço      Após o Reforço



Reforço

# Mecanismo colapso após reforço

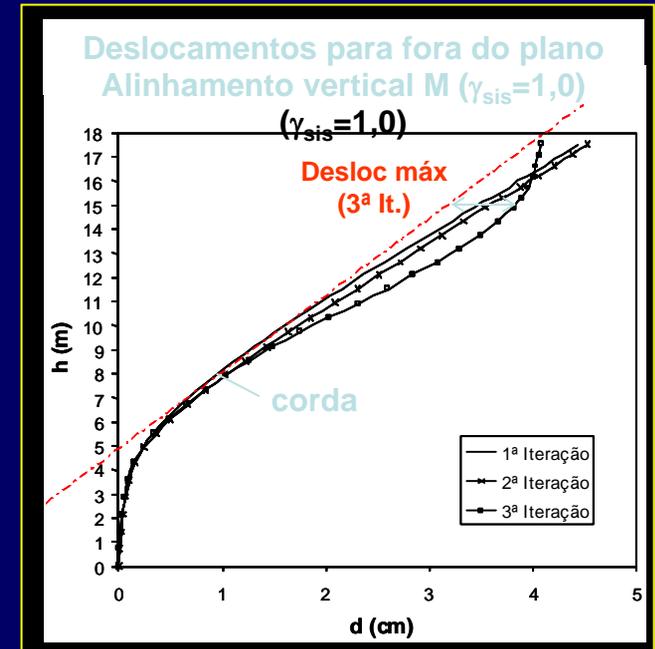
1ª Iteração  $\gamma_{sis}=0,45$

2ª Iteração  $\gamma_{sis}=0,45$

3ª Iteração  $\gamma_{sis}=0,45$

$$\gamma_{sis}^{máx} = 0,45$$

Destacamento da fachada um piso  
abaixo do observado antes do reforço:  
**Efeito de pipa**



Mecanismo de Corte na Base após reforço

**Rotura idêntica à observada antes do  
reforço**

$$\gamma_{sis}^{máx} = 0,60$$



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

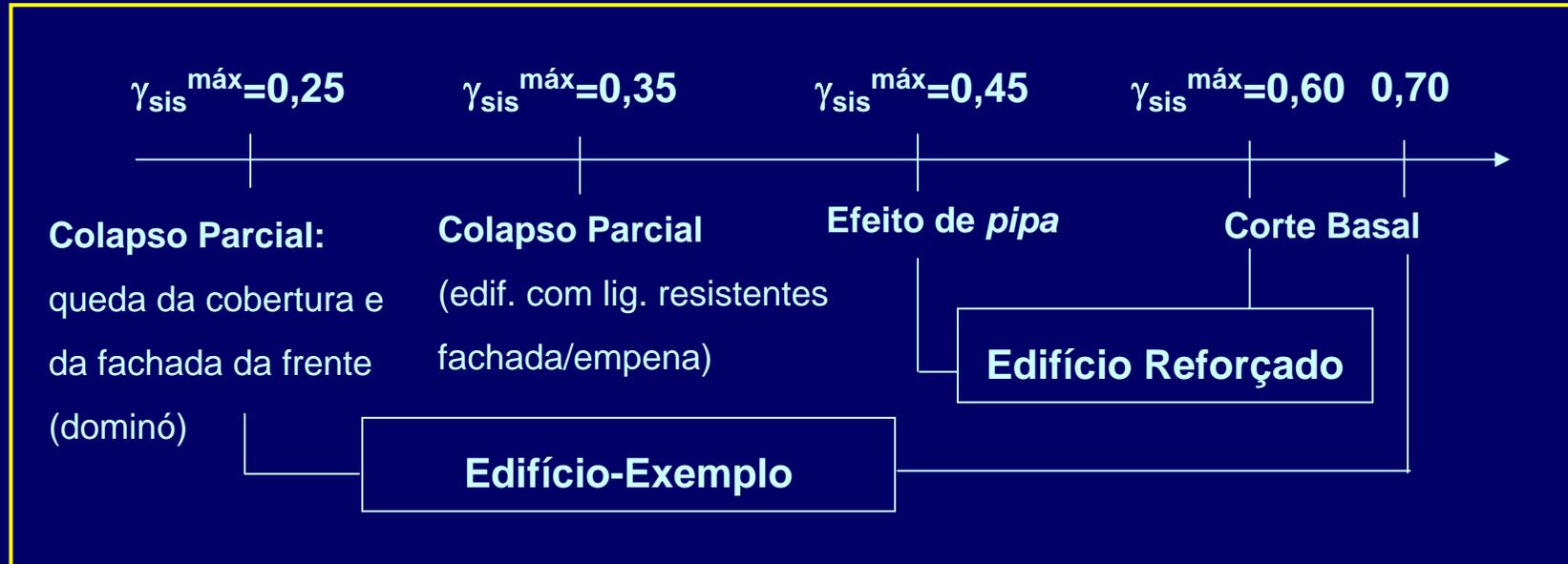
Reforço



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

## Síntese dos resultados



Reforço

## Soluções de Reforço

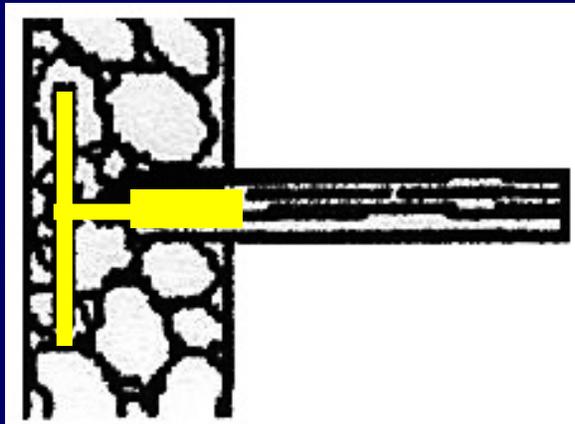
O destacamento das fachadas só pode ocorrer depois da rotura das ligações às paredes de alvenaria exteriores.



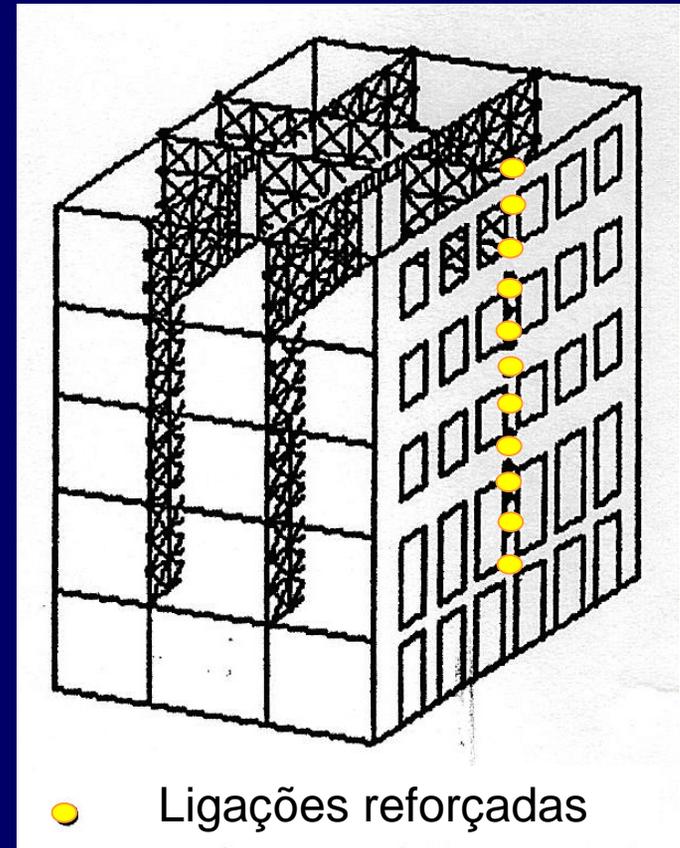
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

**Solução 1** Reforçar as ligações  
gaiola-fachadas



Conectores **Metálicos**



● Ligações reforçadas

Reforço

## Soluções de Reforço



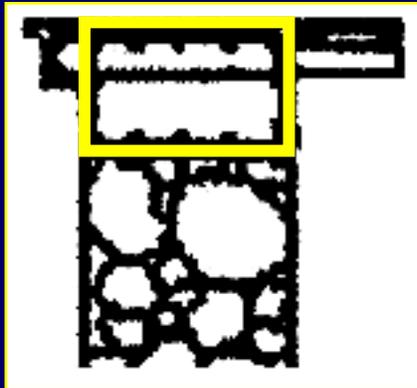
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

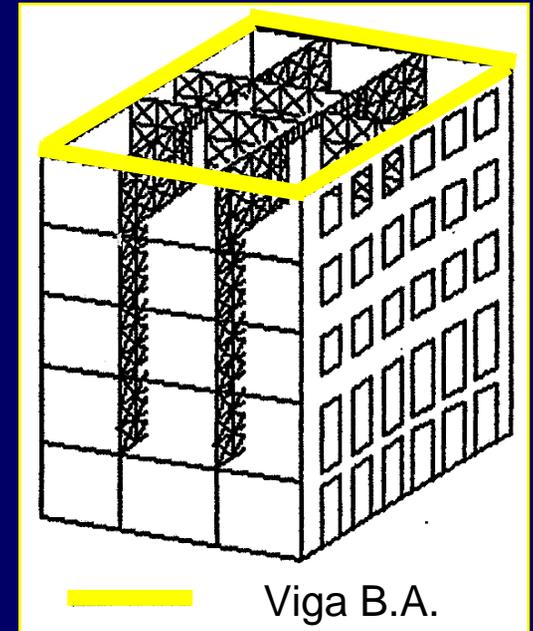
Reforço

### **Solução 2** Viga de B.A. ( $0.4 \times 0.25\text{m}^2$ )

no topo



Viga à volta do  
perímetro exterior



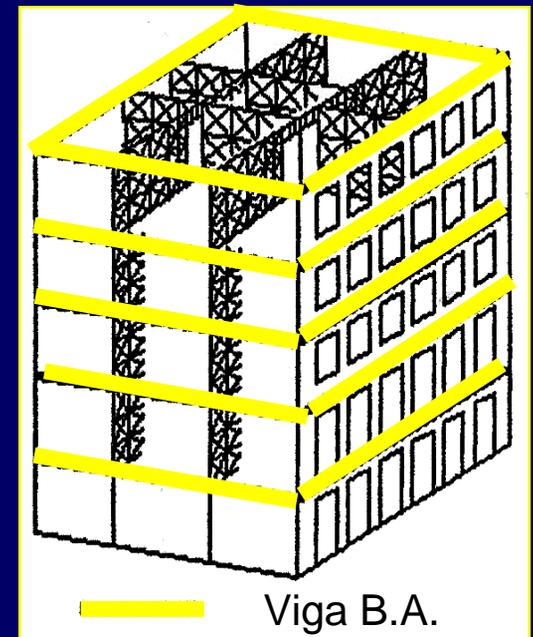
Viga B.A.

### **Solução 3** Vigas de B.A. ( $0.4 \times 0.25\text{m}^2$ )

em todos os pisos



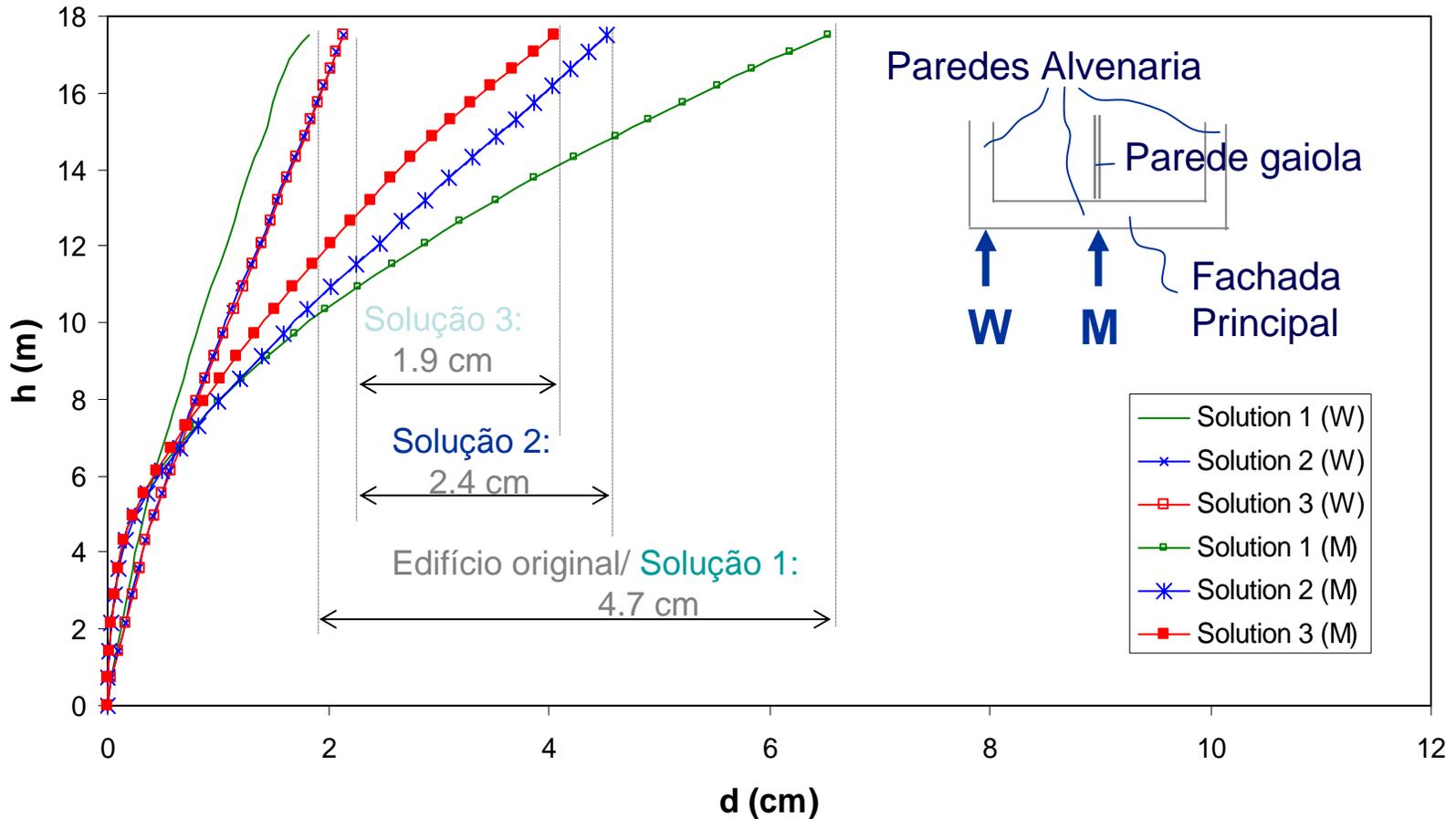
Vigas ao nível  
dos pisos



Viga B.A.

# Soluções de Reforço

## Deslocamentos fora do plano da fachada principal



As soluções onde as vigas de B.A. são usadas (2,3) reduzem os movimentos fora do plano da fachada.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Reforço

## Soluções de Reforço

Aumento da rigidez global devido à inserção das vigas de B. A.

Modo	Edifício Original / Solução 1		Edifício Original / Solução 2		Edifício Original / Solução 3	
	f [Hz]	Modos	f [Hz]	Modos	f [Hz]	Modos
1	<b>0.942</b>	<b>Translacção perpendicular à fachada</b>	1.187	Translation parallel to the front façade	1.280	Translation parallel to the front façade
2	1.055	Translation parallel to the front façade with torsion	<b>1.265</b>	<b>Translacção perpendicular à fachada</b>	<b>1.325</b>	<b>Translacção perpendicular à fachada</b>

Mais relevante na direcção perpendicular à fachada



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Reforço

## Soluções de Reforço

$\gamma_{sis}^{max}$

- Derrubamento das Fachadas
- Corte Basal

Para todas as soluções de reforço analisadas

Mecanismo Colapso	Original	Solução 1	Solução 2	Solução 3
Derrubamento das Fachadas	<b>0.25</b>	<b>0.60</b>	<b>0.45</b>	<b>0.50</b>
Corte Basal	0.70	0.70	0.60	<b>0.55</b>
Aumento resistência relativamente Original		140%	80%	100%

O mecanismo de colapso é ainda o derrubamento da fachada principal  
 Para a solução 3 a resistência a ambos os mecanismos é semelhante



INSTITUTO  
 SUPERIOR  
 TÉCNICO

DECivil

Reforço

## Alterações Estruturais

- Remoção de paredes interiores e introdução de elementos estruturais com rigidez diferente

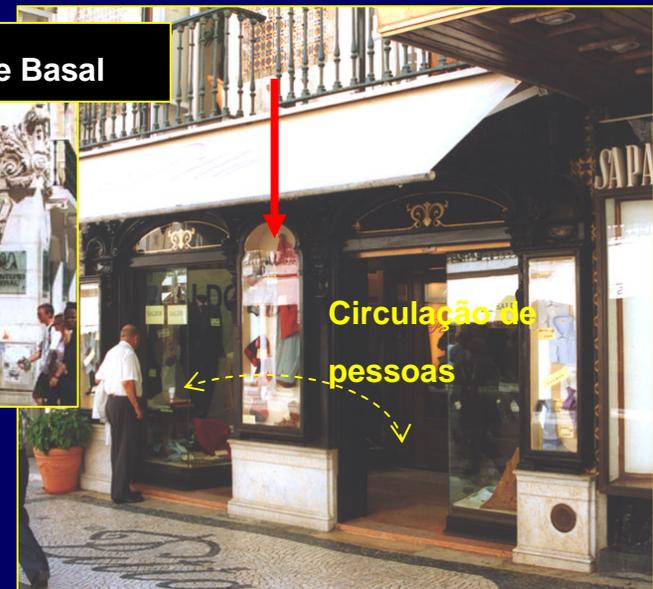
Redistribuição de esforços

- Abertura de montras



Continuidade interrompida

Corte Basal



Continuidade mantém-se



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Alterações

# Alterações Estruturais

- Aumento do número de pisos



**Massa**  
**F**  
**Inércia**



**Corte Basal**



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Alterações

## Alterações Estruturais

- Danificação dos frontais para a instalação de canalizações



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Alterações



**Rigidez / Contraventamento**





INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

# O COMPORTAMENTO SÍSMICO DOS EDIFÍCIOS POMBALINOS. PROPOSTAS DE REFORÇO

Reforço Estrutural de Edifícios Antigos

Rita BENTO e Mário LOPES

IST, Lisboa, Março 2007