



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

**DECivil**

# CONCEPÇÃO, MODELAÇÃO ESTRATÉGIAS DE REFORÇO E ANÁLISE SÍSMICA DE ESTRUTURAS ANTIGAS

Rita BENTO e Mário LOPES

IST, Lisboa, Maio 2011



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
7. INVESTIGAÇÃO EM CURSO
8. REFERÊNCIA À REGULAMENTAÇÃO EXISTENTE



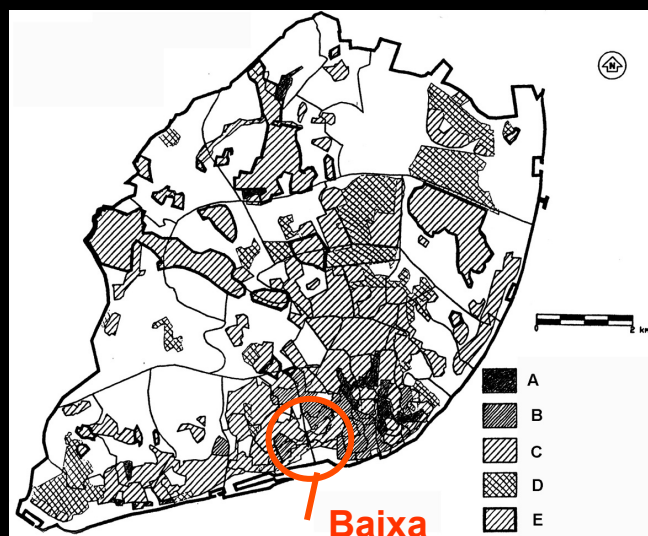


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Descrição

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



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

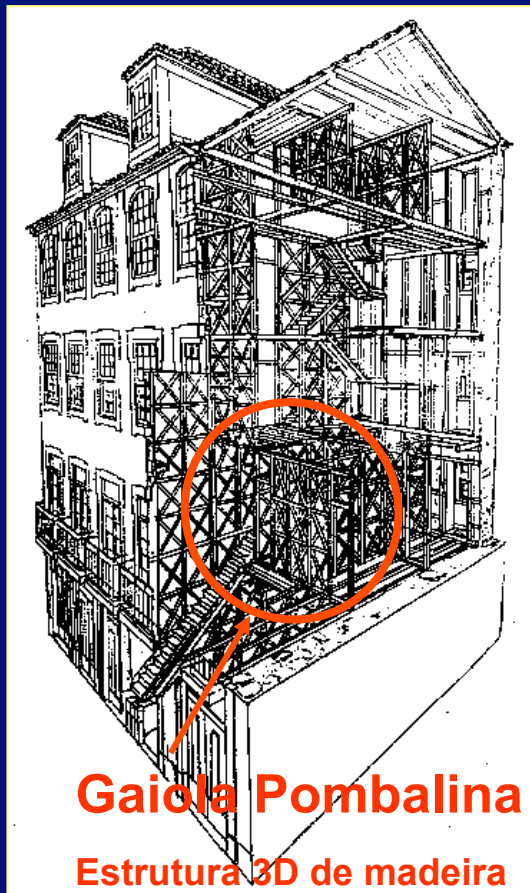


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

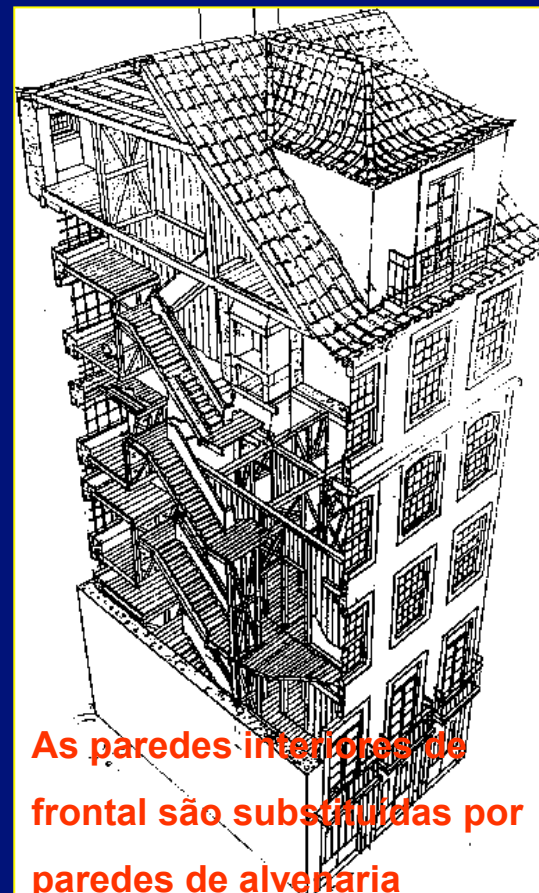
DECivil

Descrição

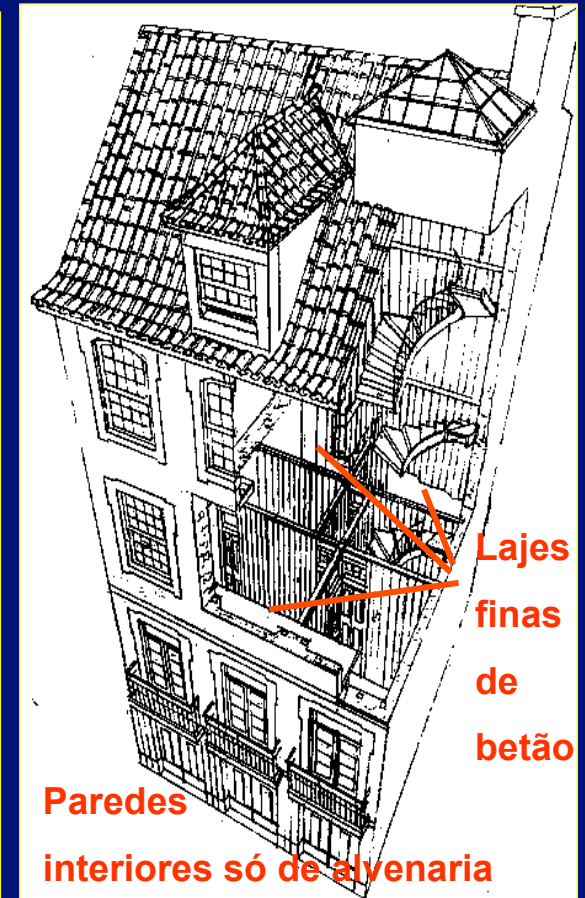
## Edifícios Pombalinos (1755 a 1880)



## Edifícios Gaioleiros (1880 a 1940)



## Edifícios de 'Placa' (1940 a 1960)



Alteração de rigidez, resistência e ductilidade



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Descrição

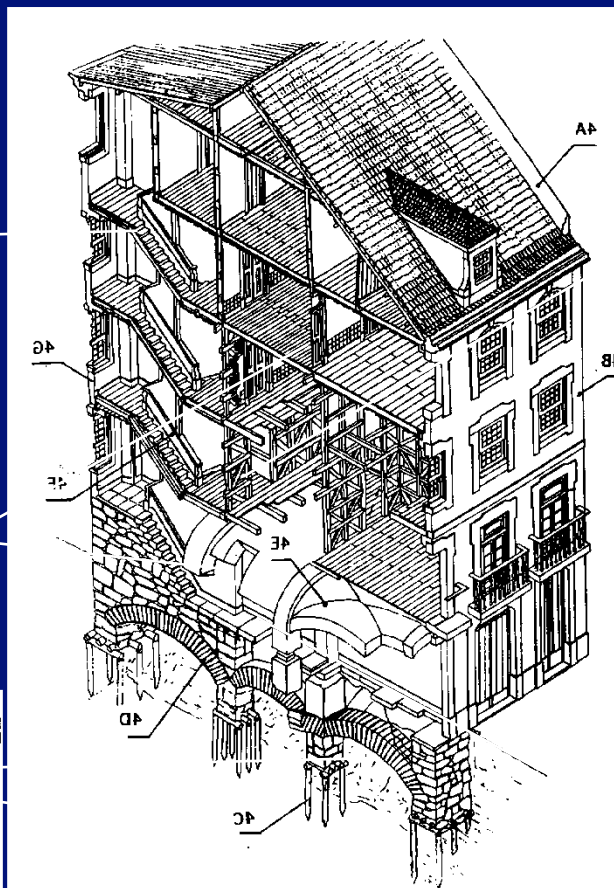
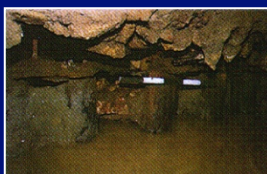
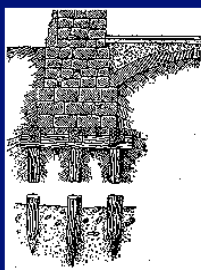
# Edifício Pombalino Tipo

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica

Número máximo de pisos: 3

águas  
furtadas

pavimentos  
de madeira



Fundações indirectas  
através de estacas  
curtas de pequeno  
diâmetro

Abóbadas de  
alvenaria de  
blocos cerâmicos  
e arcos de pedra

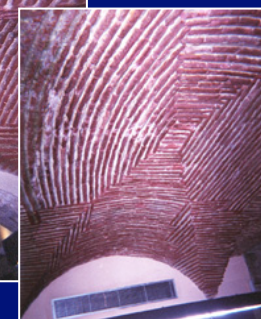
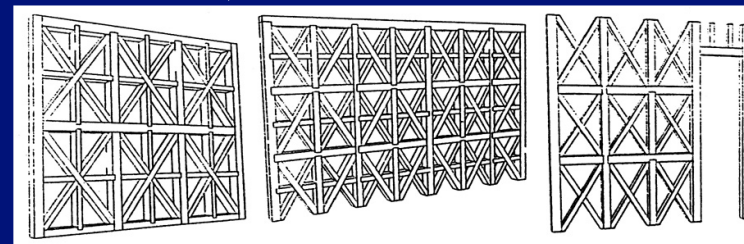
## Disposições anti-sísmicas



paredes  
interiores  
de frontal

Cruzes de Santo André

com várias geometrias possíveis







INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

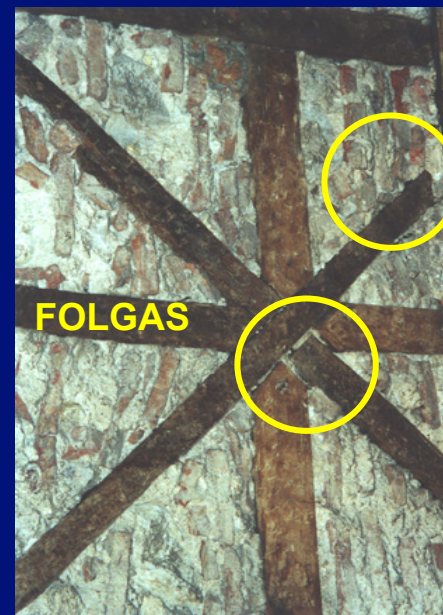
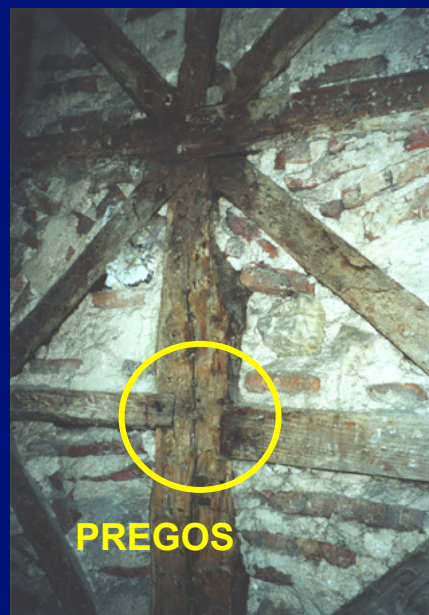
Modelação  
Edifício

## Modelação Frontal

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica

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

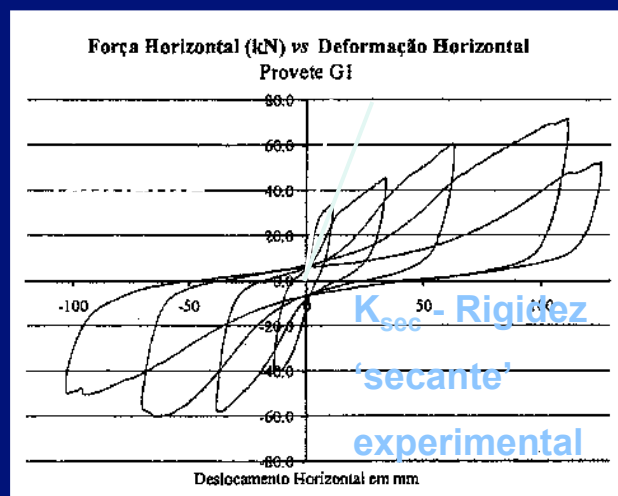
DECivil

Modelação  
Edifício

## Modelação Frontal

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica

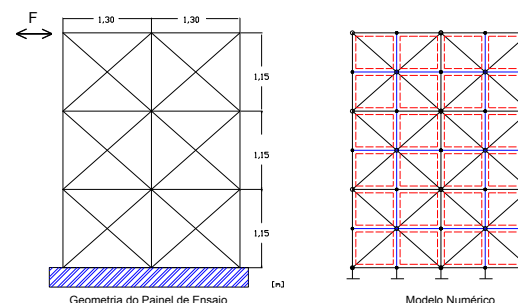
Validação do modelo - Comparação dos resultados experimentais  
de um painel ensaiado com os resultados do modelo numérico



Resultados Experimentais  
Provete 1 [Ramos, 2000]



Painel ensaiado  
[Ramos et al, 2001]



Painel considerado para validação dos resultados

Modelo do painel

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

**Rigidez numérica  
demasiado elevada**



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

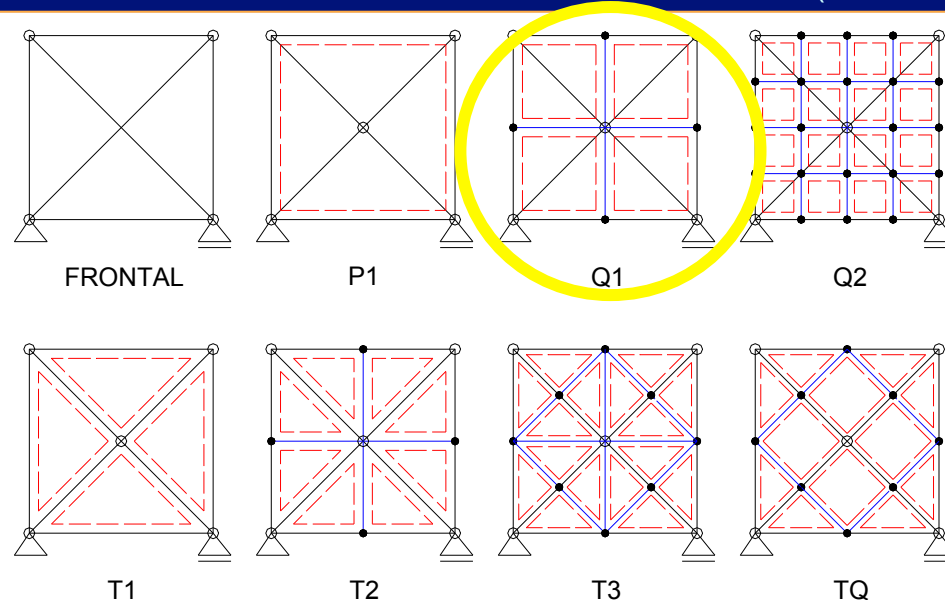
Modelação  
Edifício

# Modelação Frontal

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica

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)

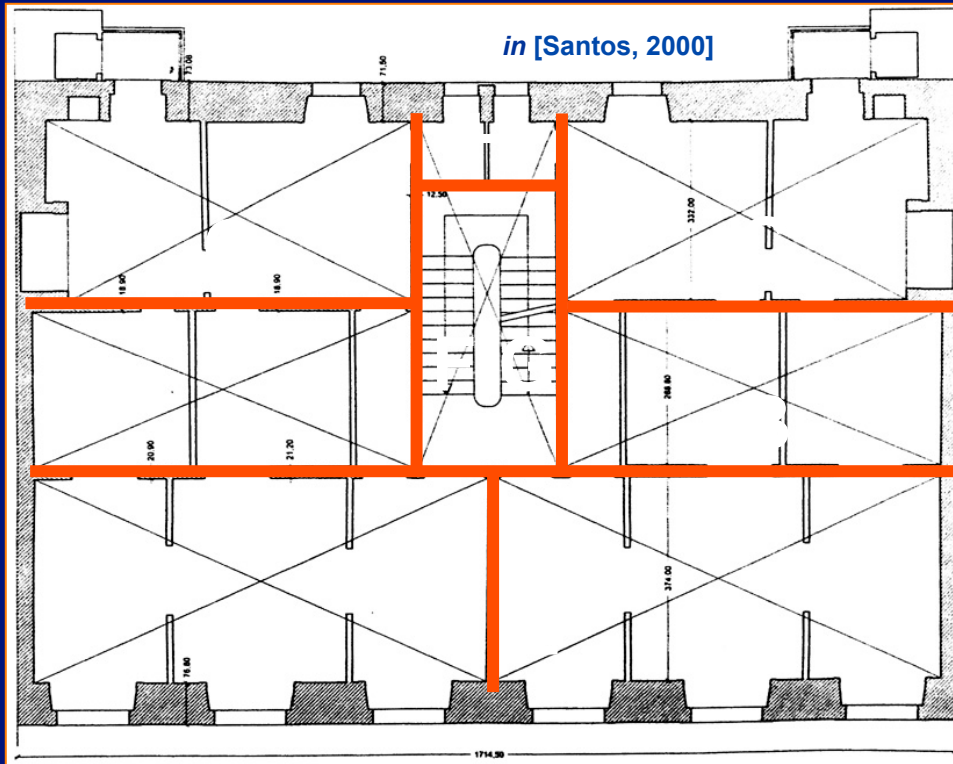
**Análise de  
sensibilidade a  
 $E$  e  $\nu$   
da alvenaria**



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Modelação  
Edifício



## Edifício-exemplo

Rua da Prata, 210 a 212







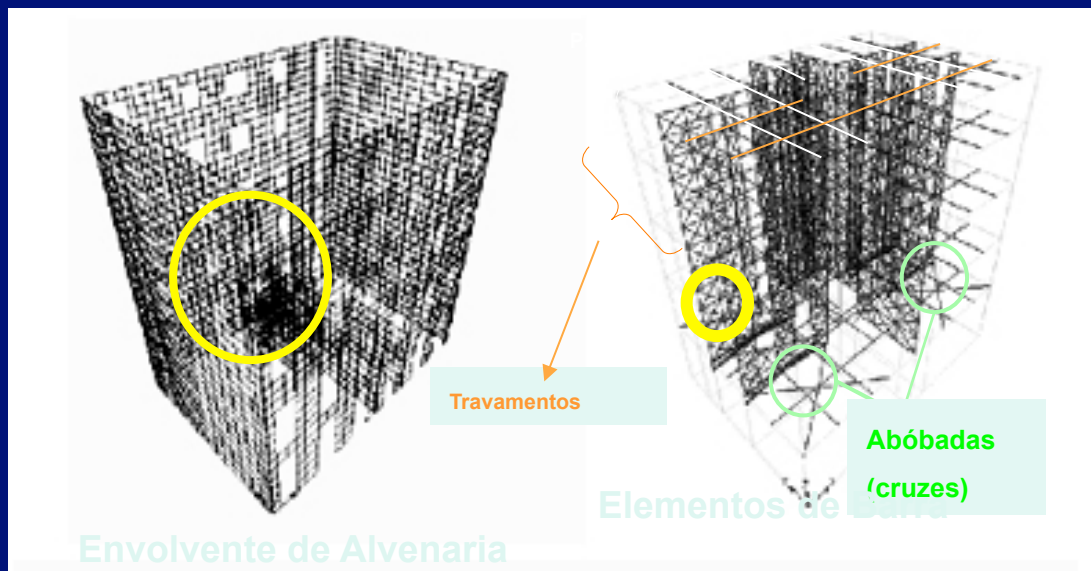
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Modelação  
Edifício

## Modelo Numérico – SAP 2000®

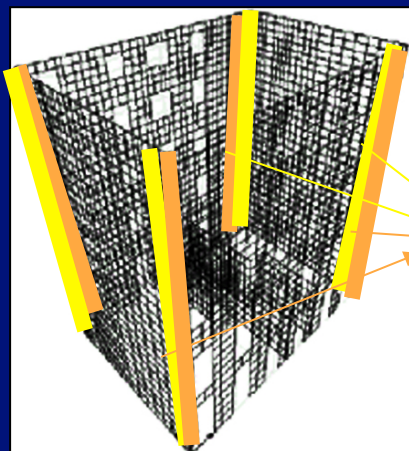
FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica



Envoltório de Alvenaria

**Paredes de Alvenaria**

Elementos 2D - *shell*



Alvenaria de  
pior qualidade

**Paredes de Frontal**

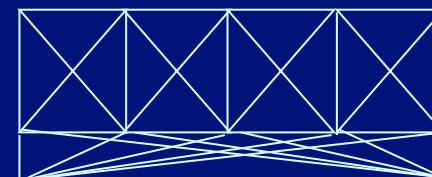
Elementos de barra bi-  
articulados

**Ligações**

**madeira / alvenaria**

Rotações permitidas

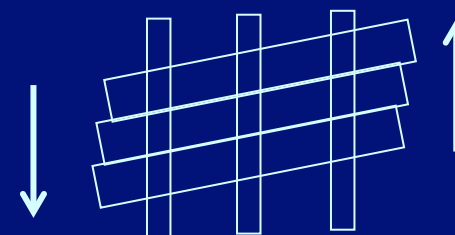
**Piso Térreo**



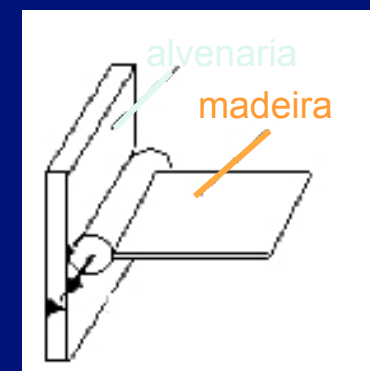
Arcos: Treliça

Abóbadas: Cruzes

**Pavimentos**



Piso deformável





# Modelo Numérico – SAP 2000®

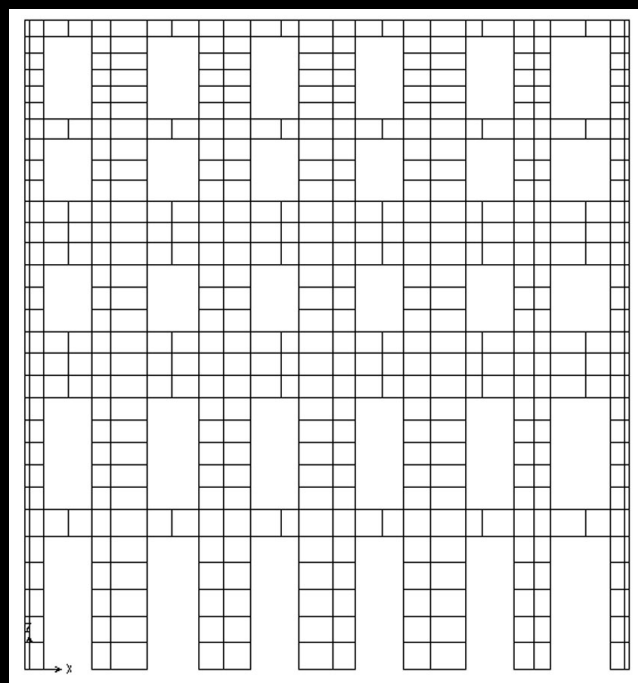
FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

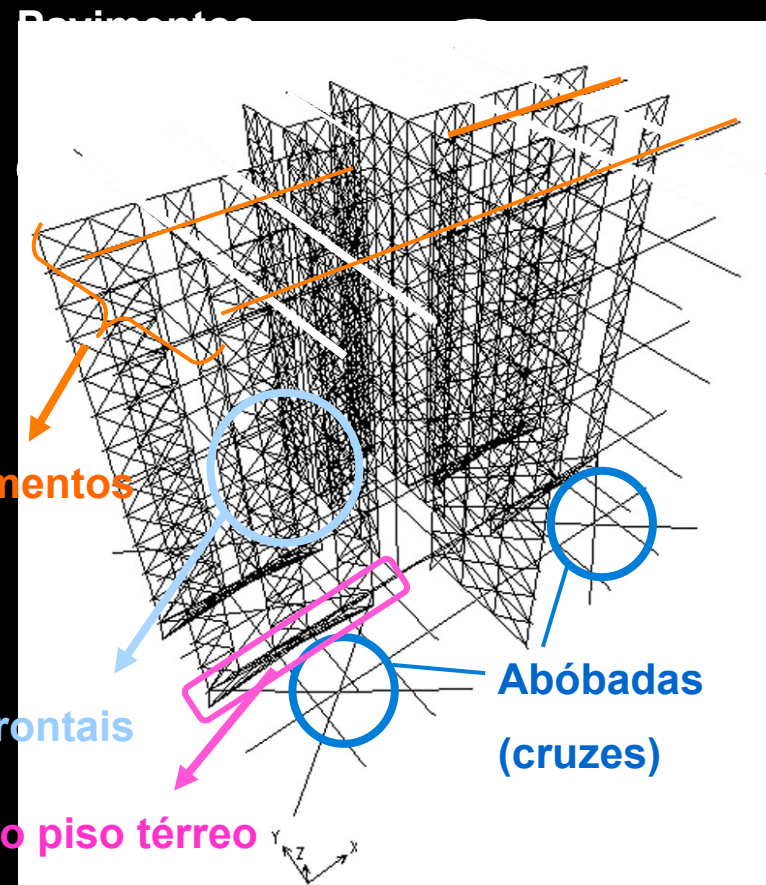
DECivil

Modelação  
Edifício



Fachada da frente

Elementos finitos 2D (*shell*)



Travamentos

Frontais

Arco do piso térreo  
(treliça)

Abóbadas  
(cruzes)

Elementos de Barra

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

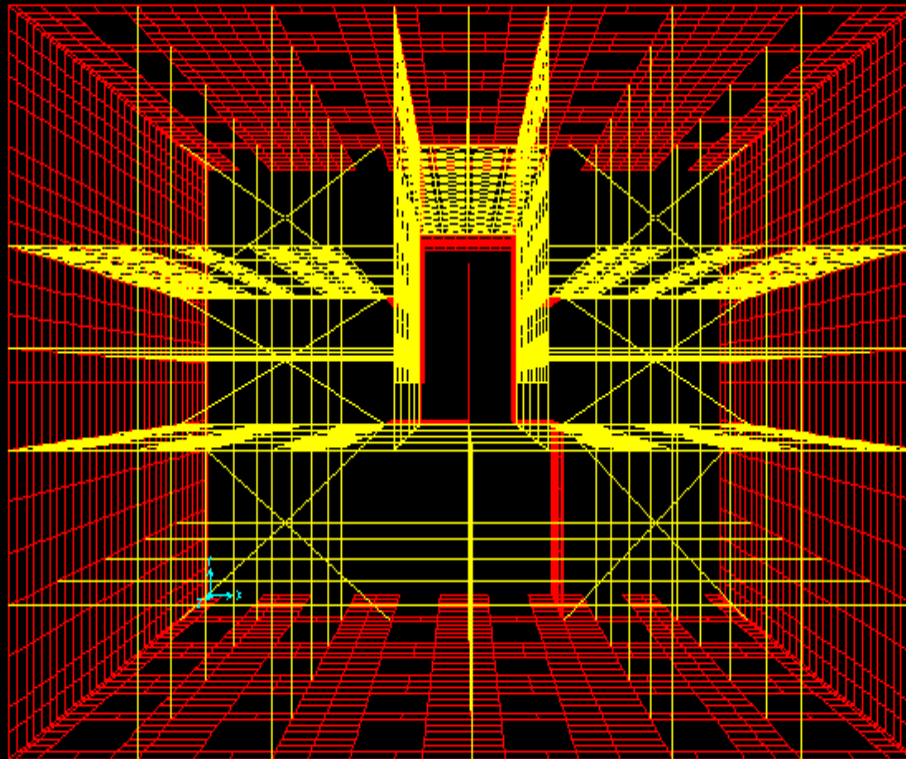


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

**DECivil**

Modelação  
Edifício

## Comportamento Dinâmico da Estrutura Original



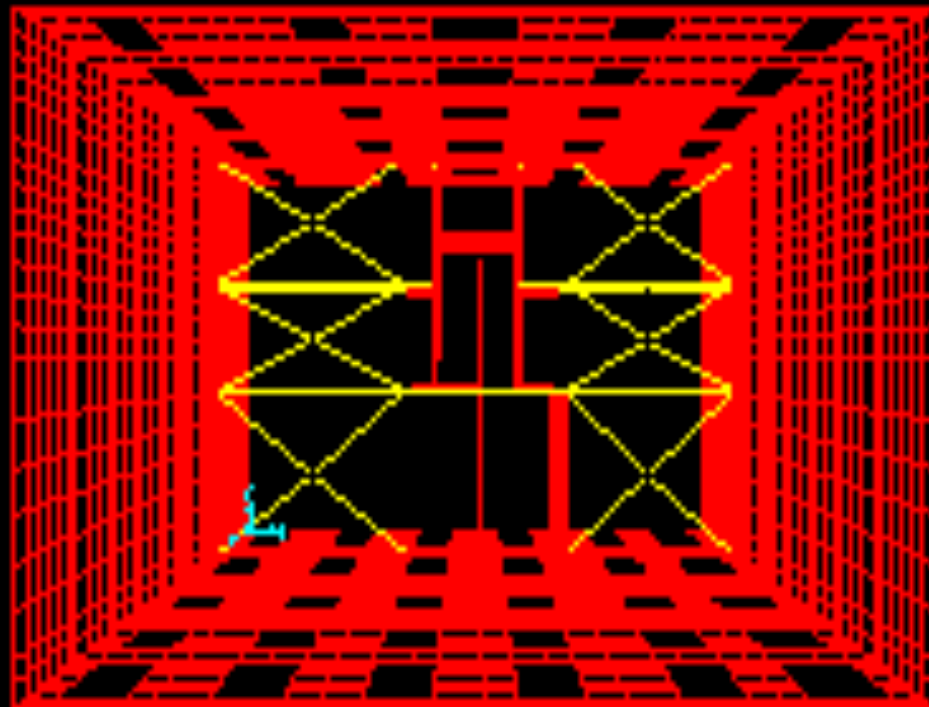
**Edifício com gaiola**  
(SAP2000®)



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

**DECivil**

Modelação  
Edifício



**Edifício sem gaiola (SAP2000®)**

## Influência da Gaiola: Confere Rigidez

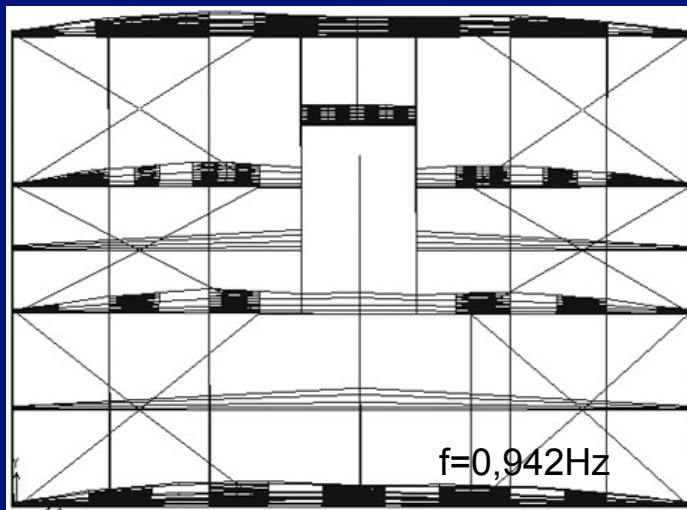


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

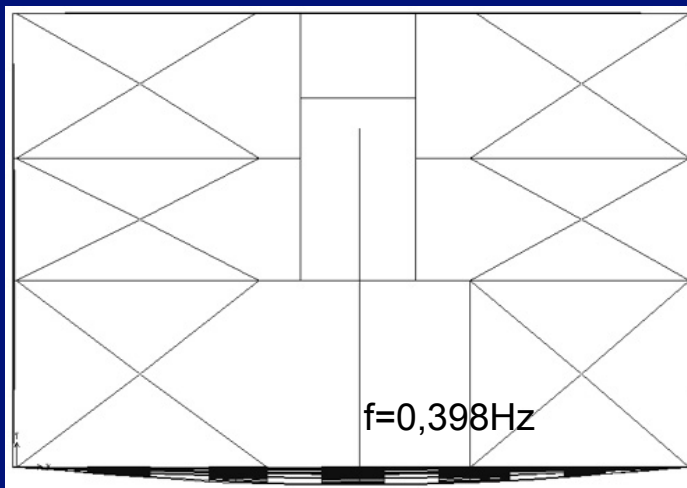
DECivil

Modelação  
Edifício

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

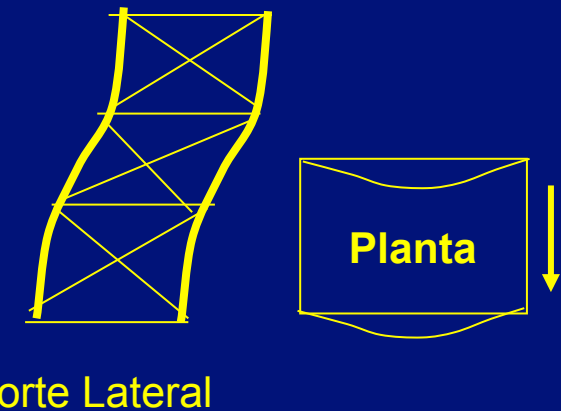


### sem gaiola ( $f=0,398$ Hz)



Impede o aparecimento de modos de vibração locais

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



Sem a gaiola,

as paredes de  
alvenaria vibram  
independentemente  
umas das outras.



Modos locais



# Quarteirão Pombalino

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica

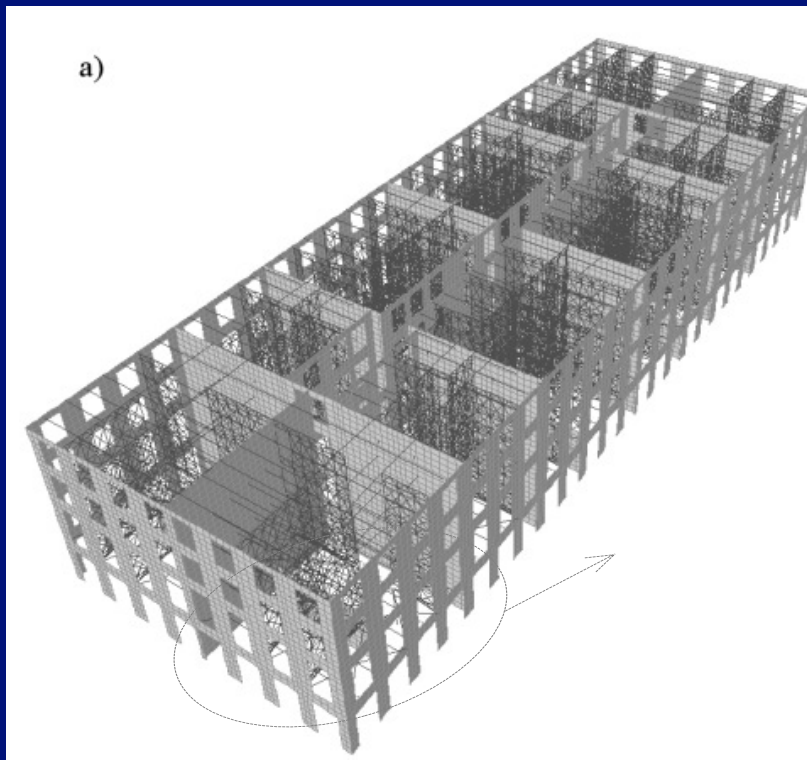


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

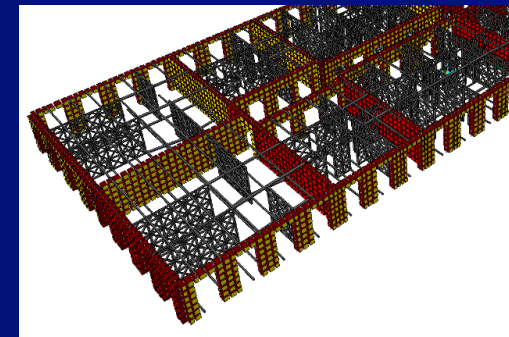
DECivil

Modelação  
Quarteirão

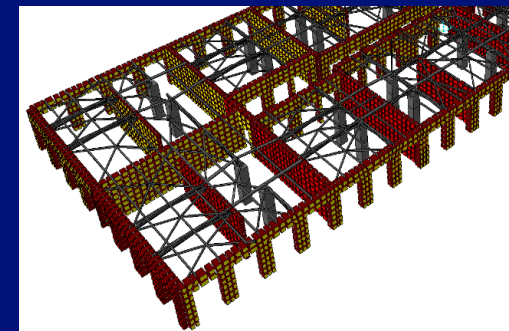
## Criação do modelo tridimensional:



- 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.



Pormenor de um piso corrente



Pormenor do piso térreo

# Frequências e Modos de Vibração

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica

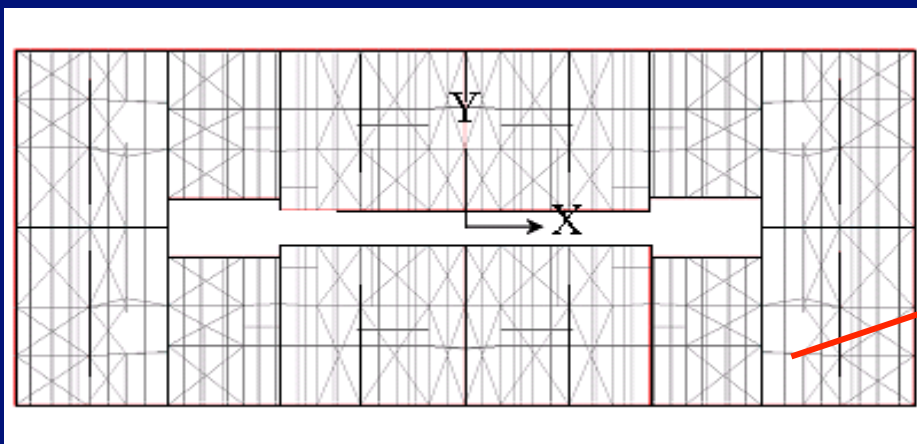


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

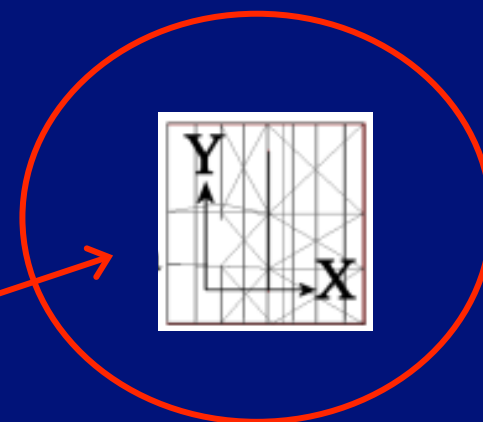
DECivil

Modelação  
Quarteirão

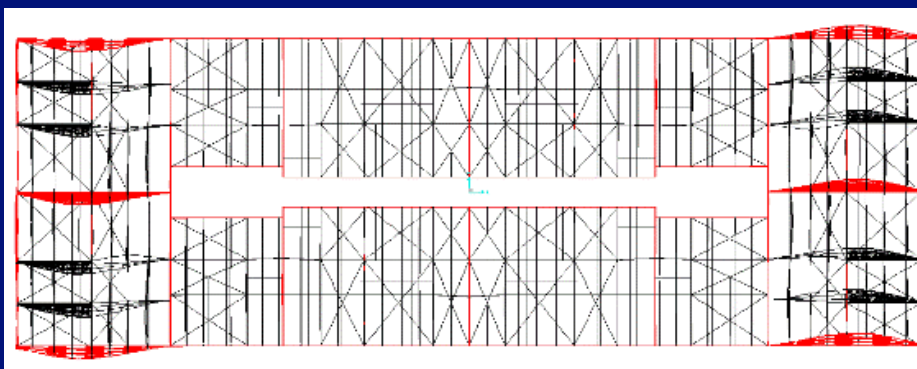
Quarteirão vs edifício isolado:



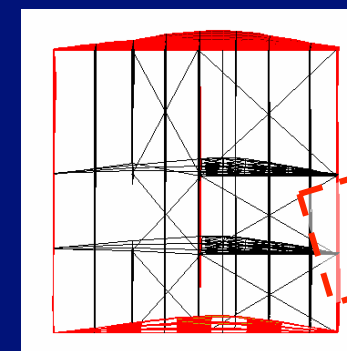
Modelo global do quarteirão



Modelo de edifício de  
gaveto isolado



1.58Hz – 1º modo translacção



1.25Hz – 1º modo translacção

EFEITO  
QUARTEIRÃO

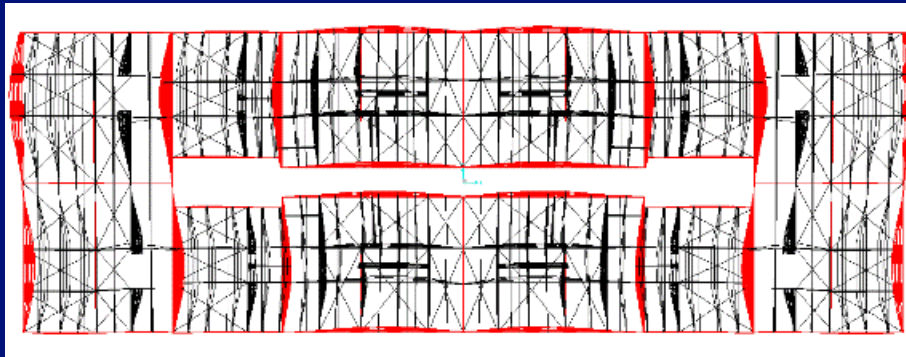


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

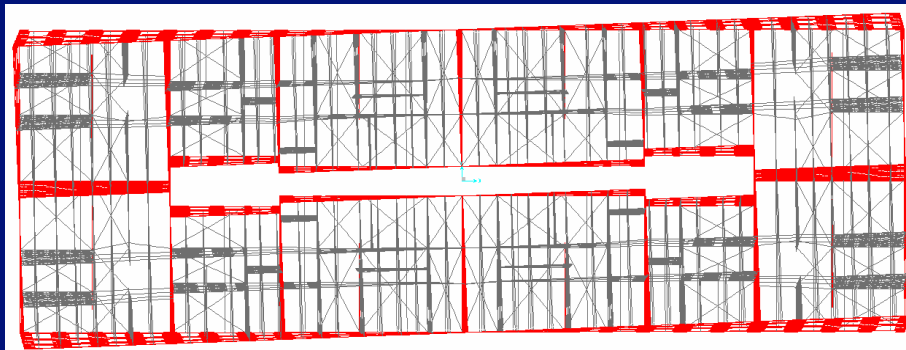
DECivil

Modelação  
Quarteirão

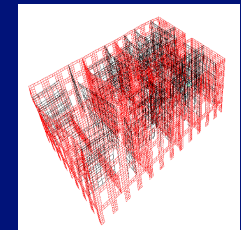
## Influência da deformabilidade do piso na resposta da estrutura:



Sem piso rígido (real?)



Com piso rígido (irreal)



Rigidez axial  
*versus*  
Piso rígido

COMPORTAMENTO  
QUARTEIRÃO ?

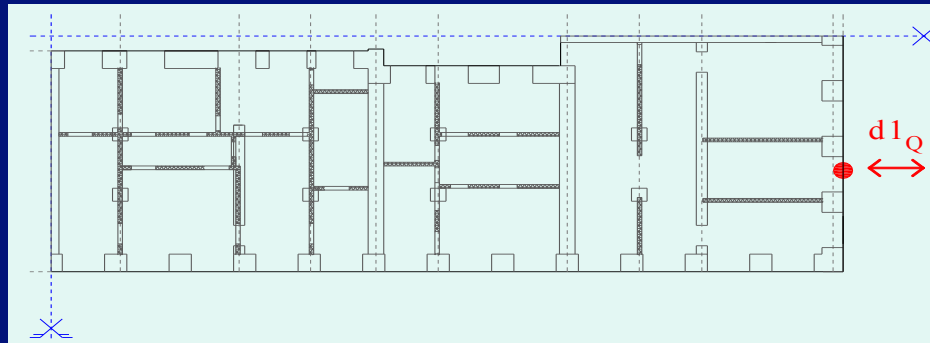


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

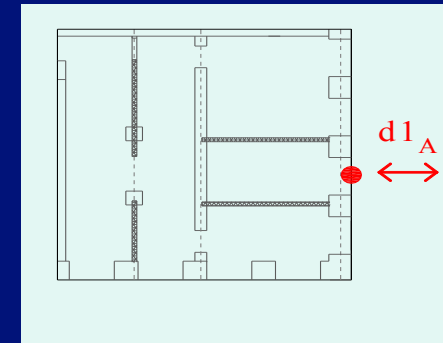
DECivil

Modelação  
Quarteirão

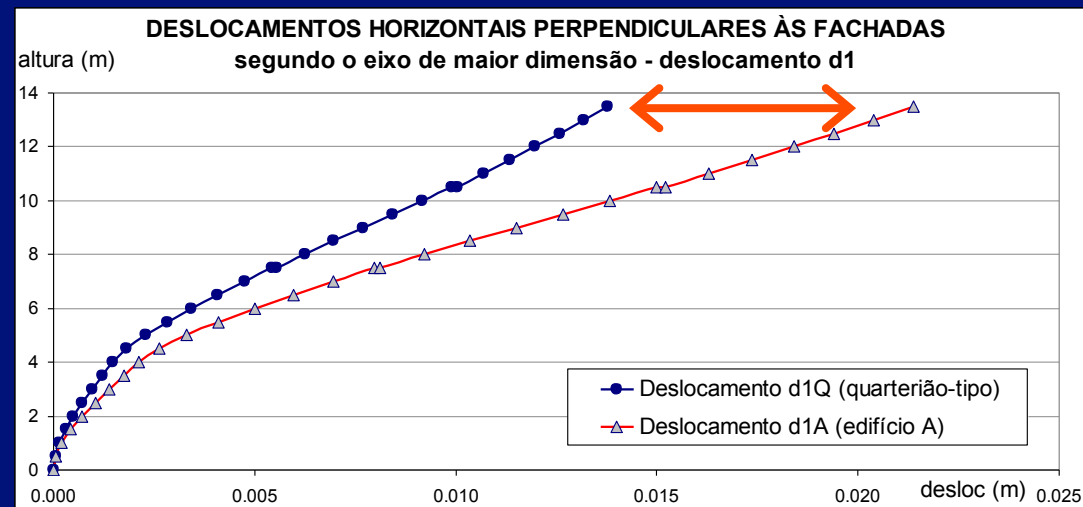
## Efeito de conjunto vs comportamento de edifício isolado:



Deslocamento fachada quarteirão



Deslocamento fachada  
edifício isolado



Comparação deslocamentos

**EFEITO  
QUARTEIRÃO**



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Resultados

## Mecanismo de Colapso

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica

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





INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Resultados

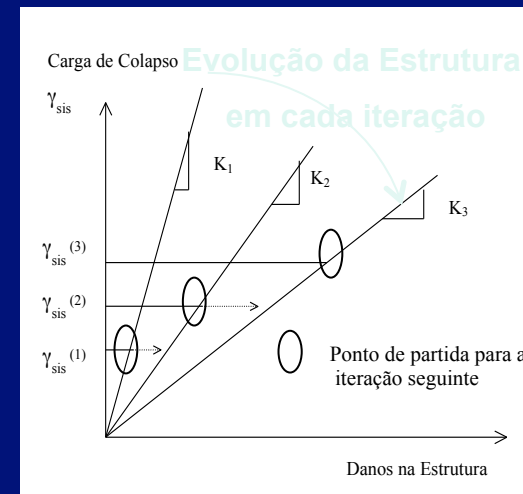
## Fontes de Não Linearidade

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

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica

### 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

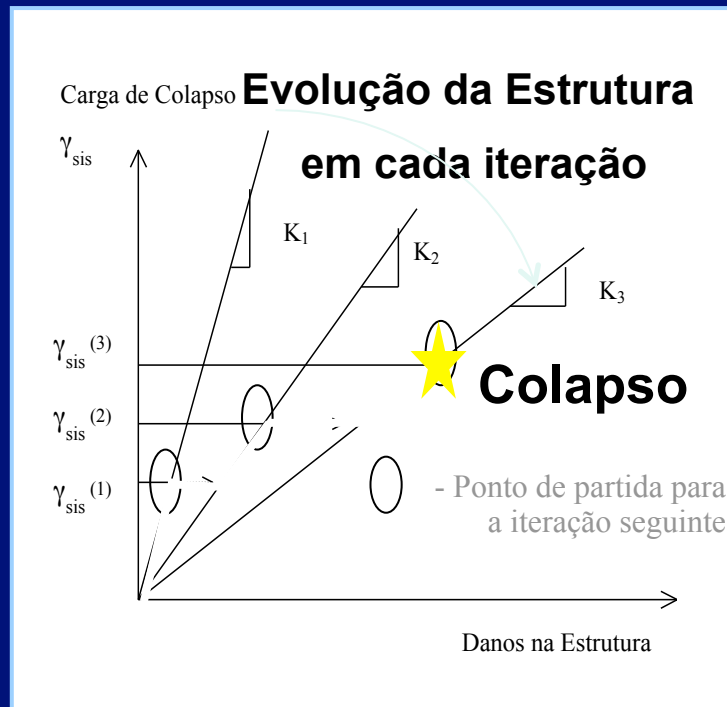


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Resultados

## 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

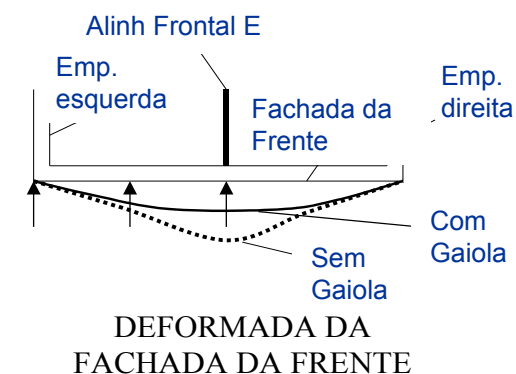
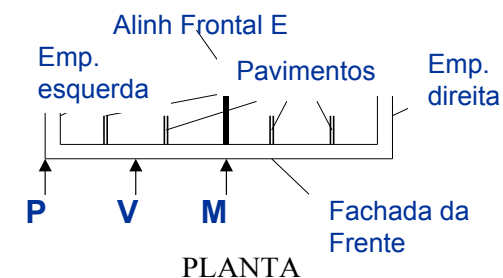
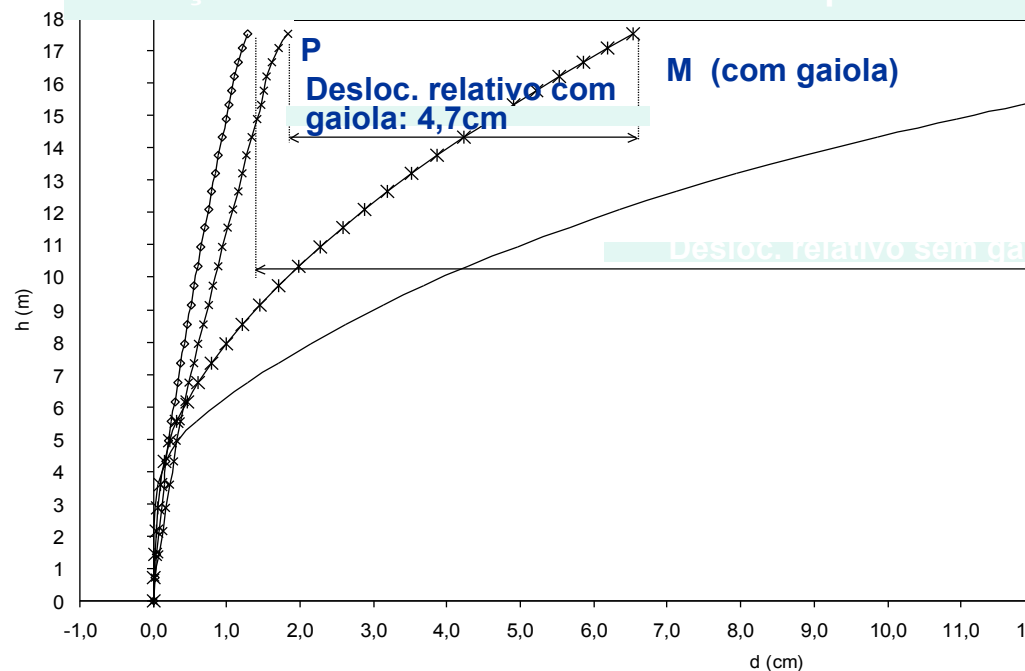


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

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

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO  
**DECivil**

Resultados

1ª Iteração  $\gamma_{sis}=0,25$

2ª Iteração  $\gamma_{sis}=0,25$

3ª Iteração  $\gamma_{sis}=0,25$

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

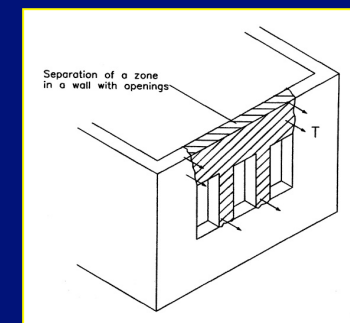
Sismo de 9 de Julho de 1988  
Fotografias tiradas na Horta -  
Açores, 2001

## 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]

# Vulnerabilidade sísmica

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Resultados

Cálculo de danos para intensidades crescentes da  
acção sísmica

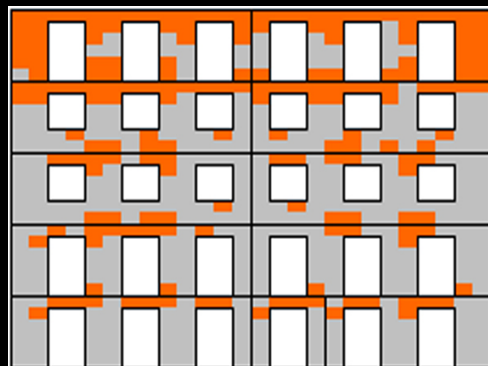
$$F_{sd} = F_{CQP} \pm \gamma_{sis} F_E$$



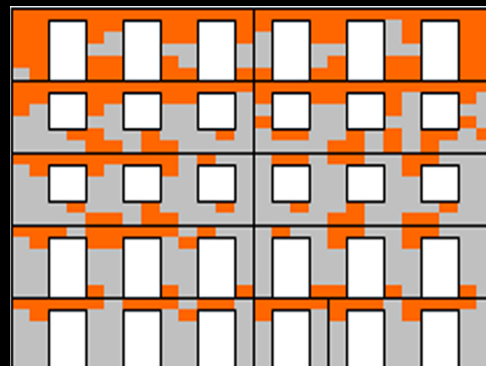
$\gamma_{sis}^{máx}$

Intensidade da  
Acção Sísmica  
de **COLAPSO**

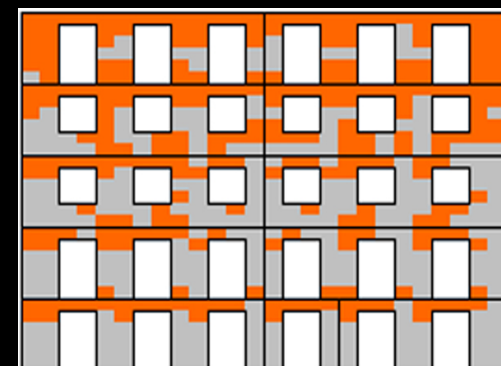
Mapas de danos na alvenaria: Fachada da Frente



$\gamma_{sis} = 0.20$



$\gamma_{sis} = 0.25$



$\gamma_{sis} = 0.30$

Danos na alvenaria devido a tracção – Fachada da frente





INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Resultados

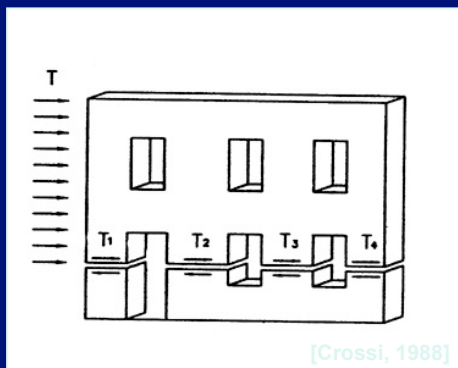
## Mecanismo de Corte na Base

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica

$$\gamma_{sis}^{máx} = 0,70$$

### 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

$$\gamma_{sis}^{máx} = 0,35$$

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

# Solução de Reforço

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica



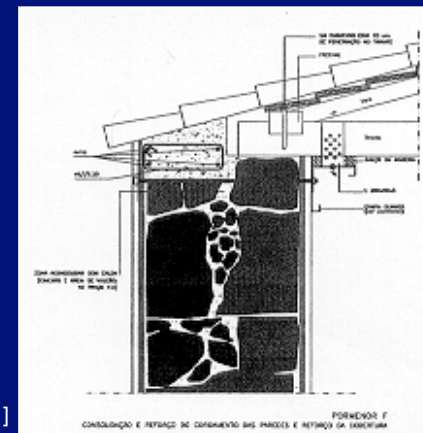
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Reforço

## REFORÇO:

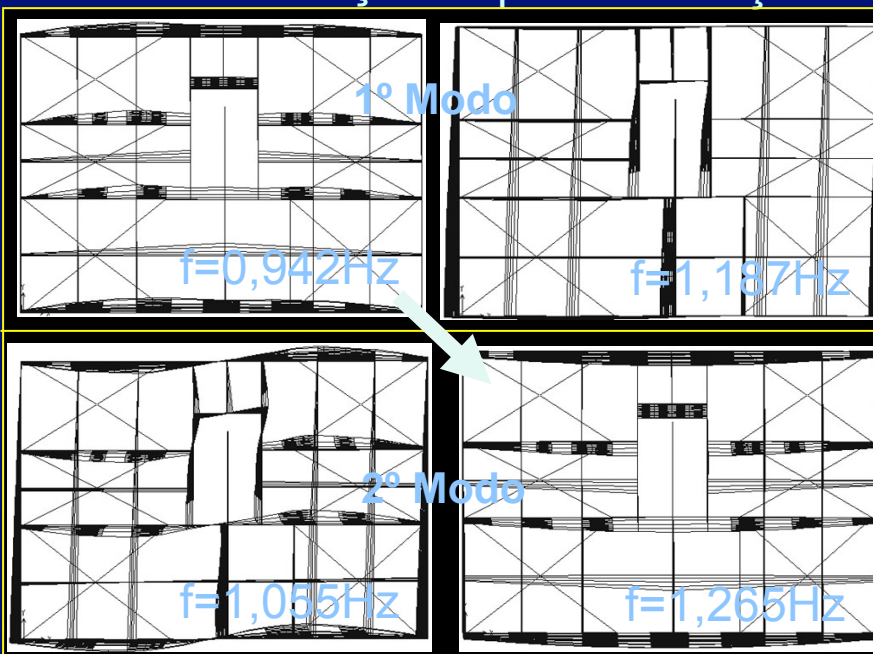
Viga de BA (0,6mx0,25m) construída no topo do edifício, ao longo de todo o perímetro exterior



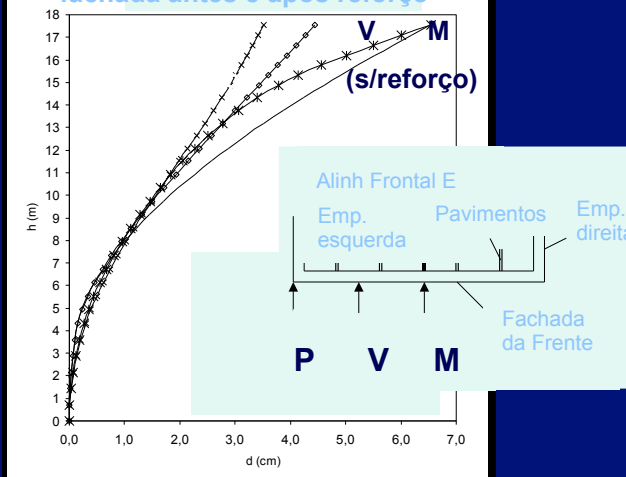
[Costa e Vasconcelos, 2001]

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

Antes do Reforço      Após o Reforço



Evolução dos deslocamentos da fachada antes e após reforço





INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

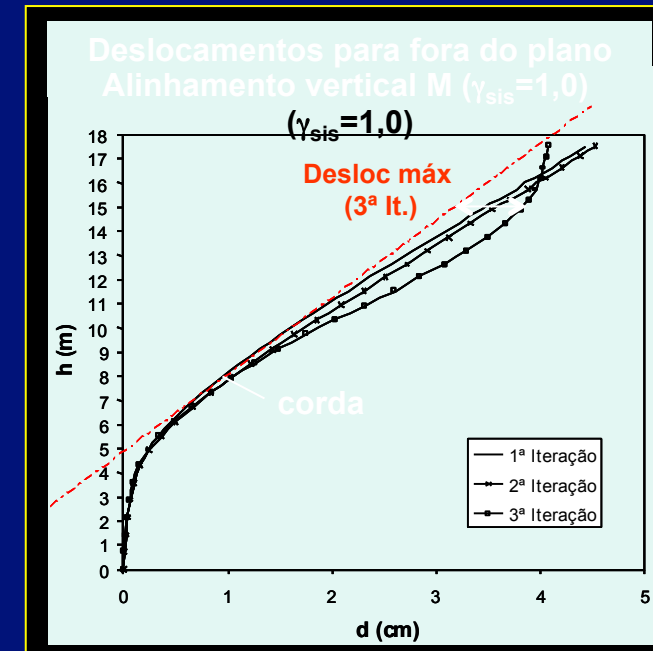
DECivil

Reforço

## Mecanismo colapso após reforço

$$\left. \begin{array}{l} 1^{\text{a}} \text{ Iteração } \gamma_{\text{sis}}=0,45 \\ 2^{\text{a}} \text{ Iteração } \gamma_{\text{sis}}=0,45 \\ 3^{\text{a}} \text{ Iteração } \gamma_{\text{sis}}=0,45 \end{array} \right\} \gamma_{\text{sis}}^{\text{máx}}=0,45$$

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**

$$\gamma_{\text{sis}}^{\text{máx}}=0,60$$

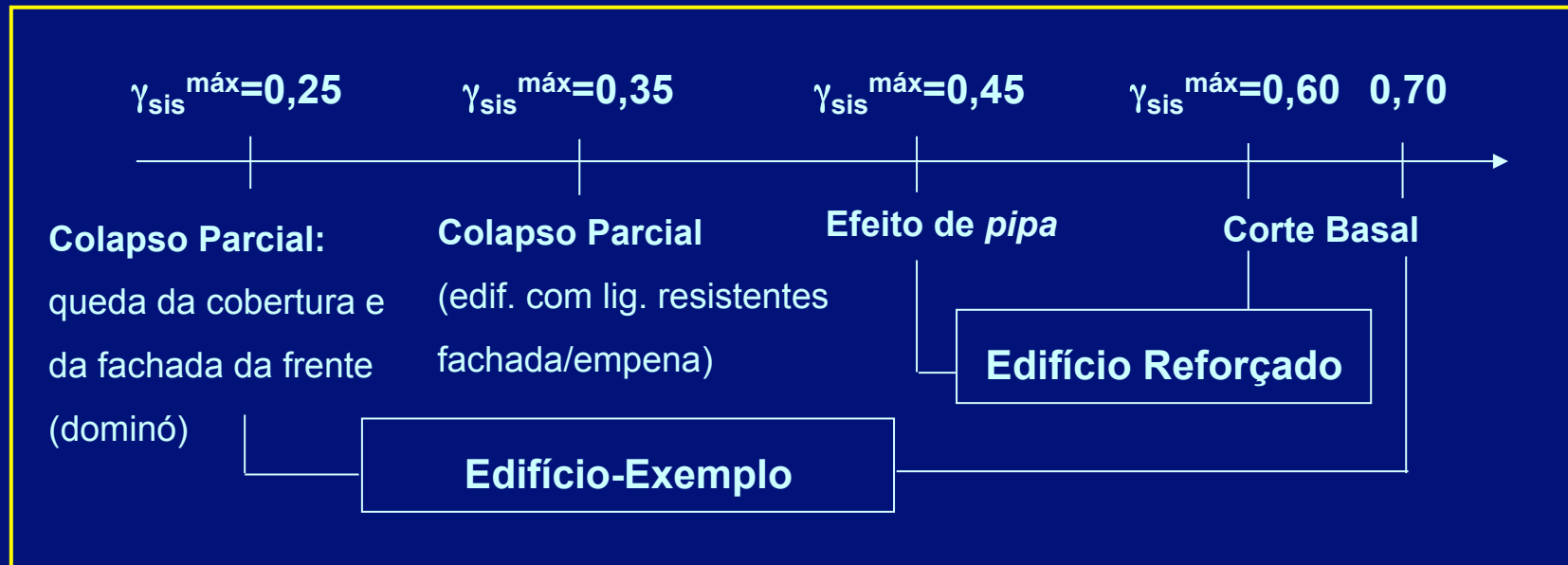


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Reforço

## Síntese dos resultados



# Soluções de Reforço

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica



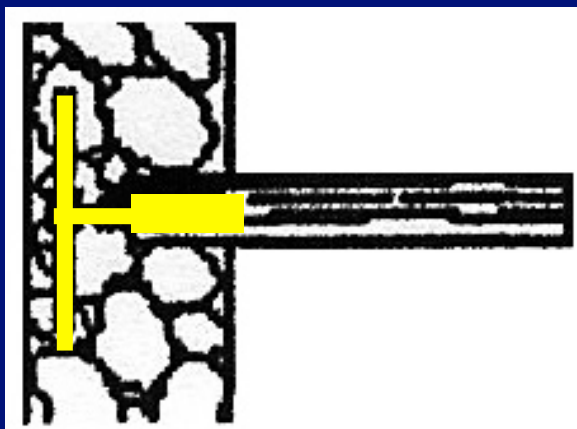
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

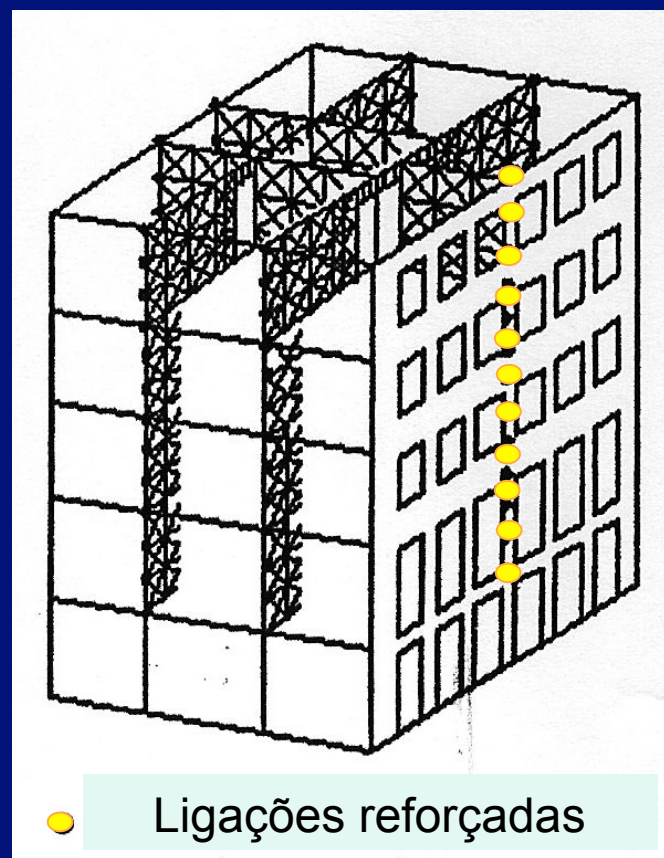
Reforço

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

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



Conectores Metálicos







INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

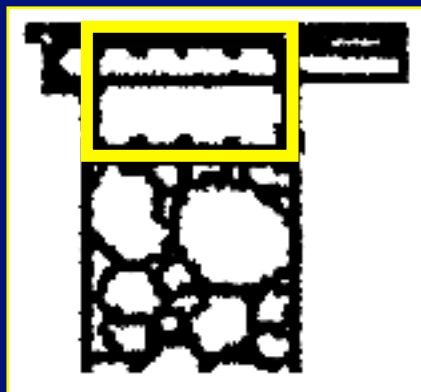
DECivil

Reforço

## Soluções de Reforço

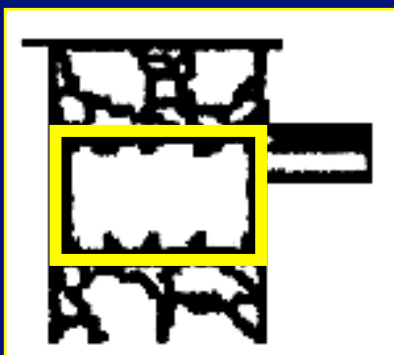
FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica

**Solução 2** Viga de B.A. ( $0.4 \times 0.25\text{m}^2$ )  
no topo

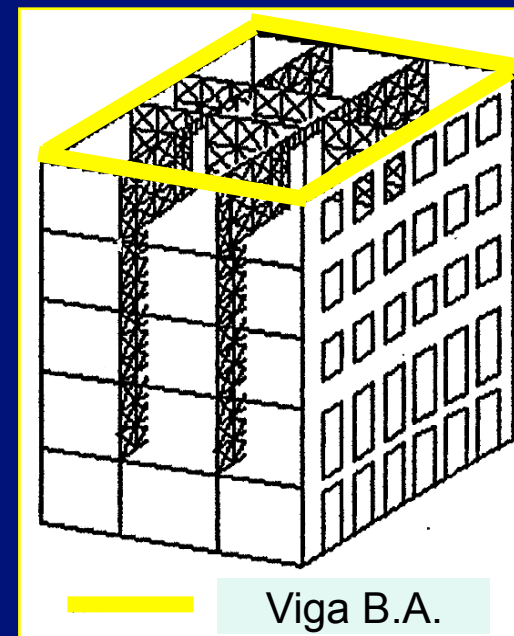


Viga à volta do  
perímetro exterior

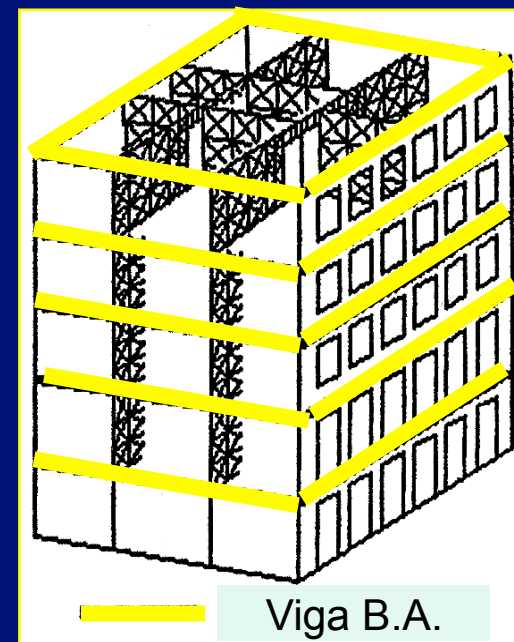
**Solução 3** Vigas de B.A. ( $0.4 \times 0.25\text{m}^2$ )  
em todos os pisos



Vigas ao nível  
dos pisos



Viga B.A.



Viga B.A.

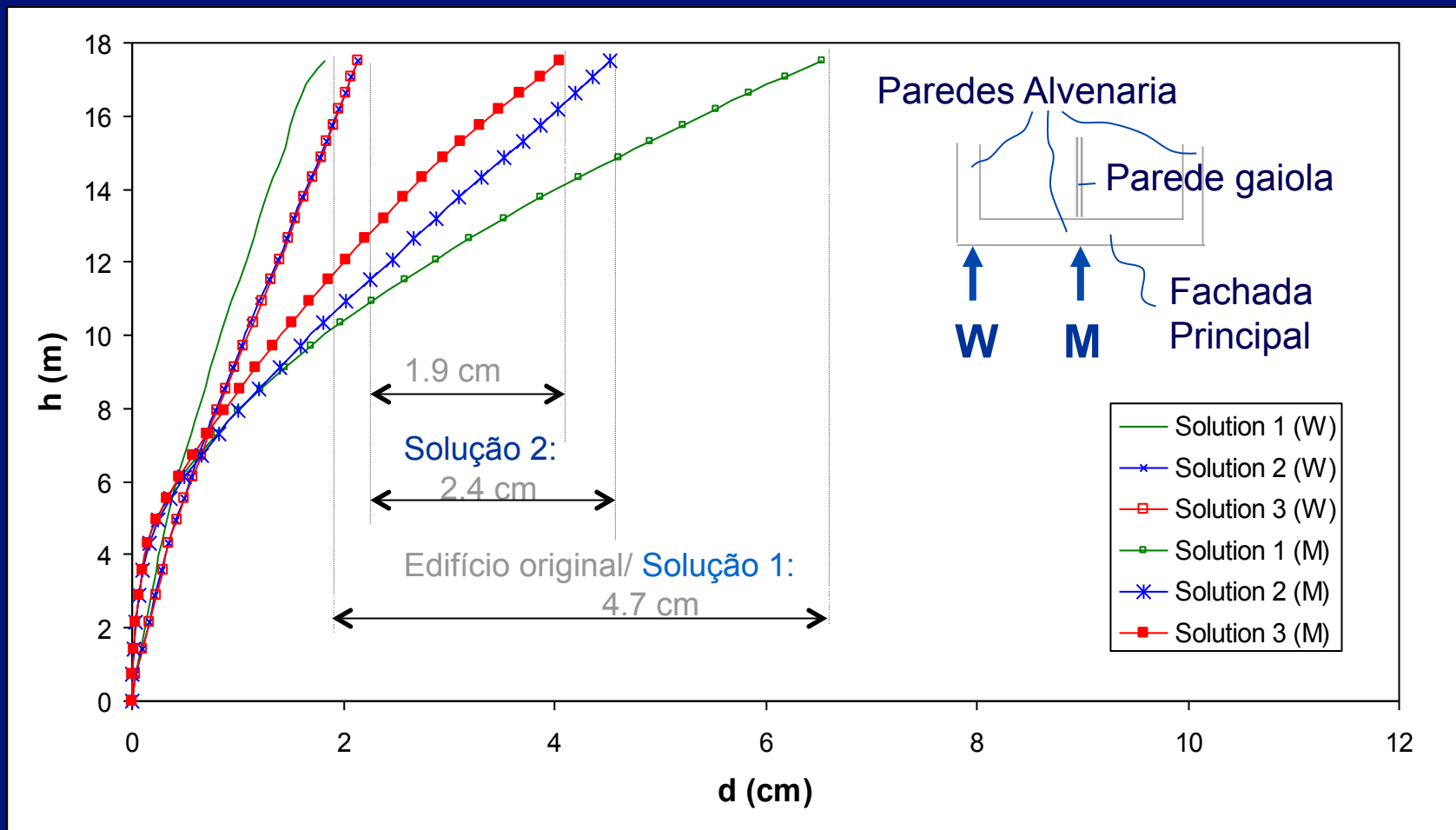


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

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.

## Soluções de Reforço

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Reforço

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

| Modo | Edifício Original /<br>Solução 1 |                                                       | Edifício Original /<br>Solução 2 |                                            | Edifício Original /<br>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

## Soluções de Reforço

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

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                  | 0.25     | 0.60      | 0.45      | 0.50      |
| Corte Basal                                | 0.70     | 0.70      | 0.60      | 0.55      |
| 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

Alterações

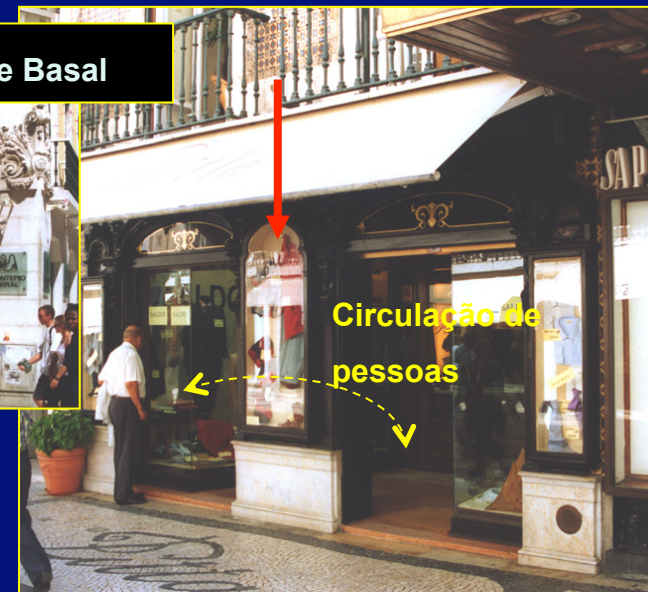
- Remoção de paredes interiores e introdução de elementos estruturais com rigidez diferente

Redistribuição de esforços

- Abertura de montras



Continuidade interrompida



Continuidade mantém-se



# Alterações Estruturais

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Alterações

- Aumento do número de pisos



Massa

$F_{Inércia}$



Corte Basal







INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Alterações

- Danificação dos frontais para a instalação de canalizações



Rigidez / Contraventamento



# Investigação em curso

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica

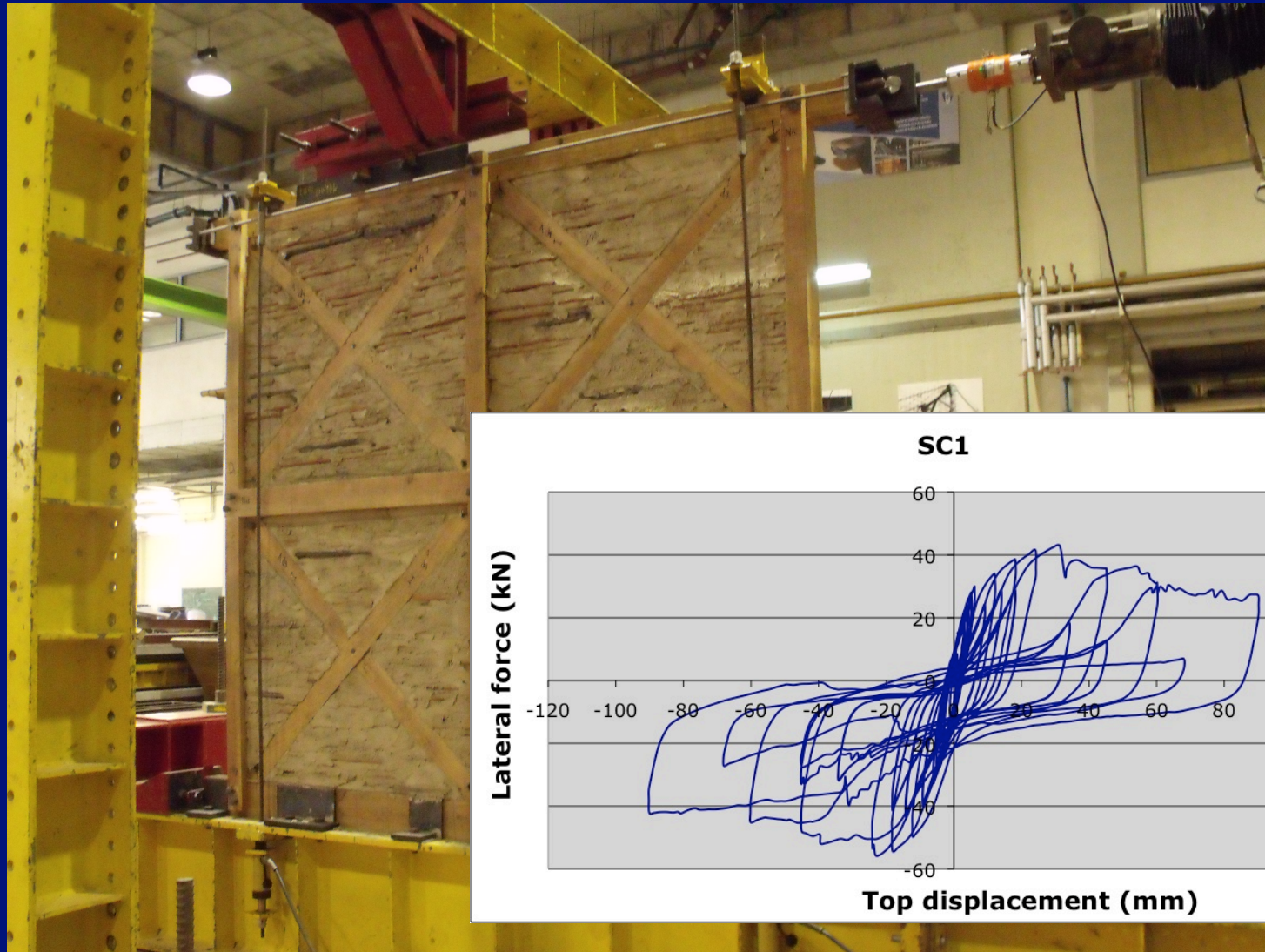


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Investigação

- Projecto FCT PTDC/ECM/100872/2008, Vulnerabilidade Sísmica de Edifícios Antigos de Alvenaria <http://www.severes.org/>





# Investigação em curso

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

**DECivil**

Investigação





# Investigação em curso

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Investigação



# Investigação em curso

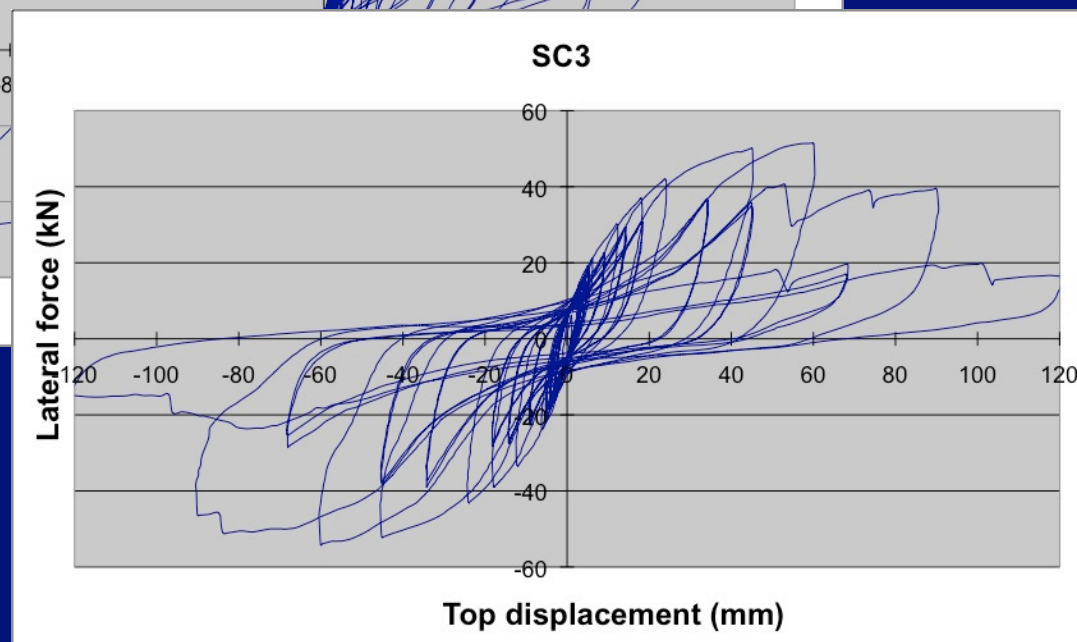
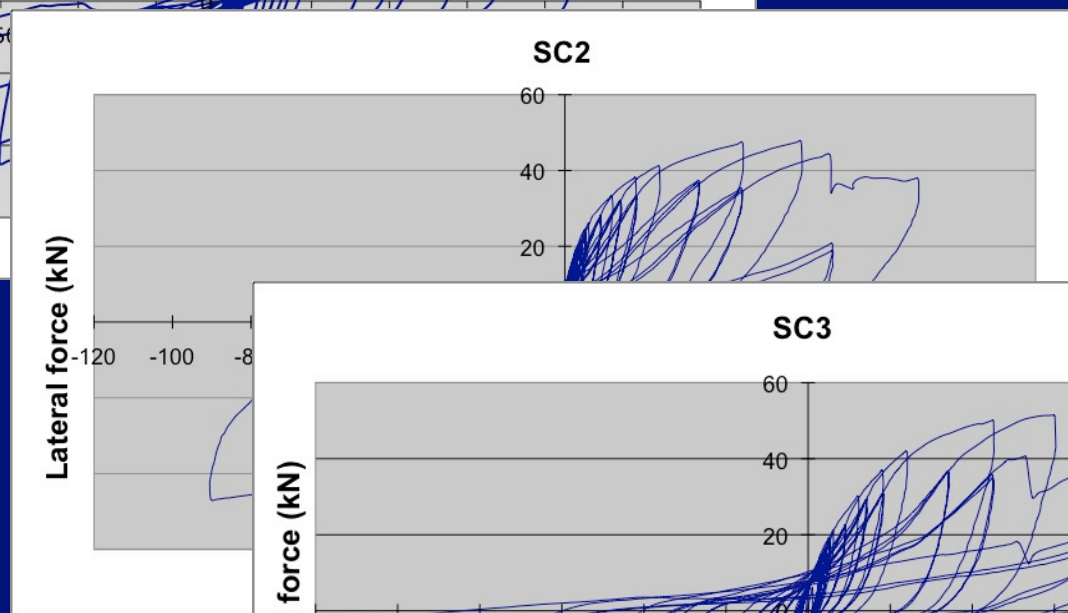
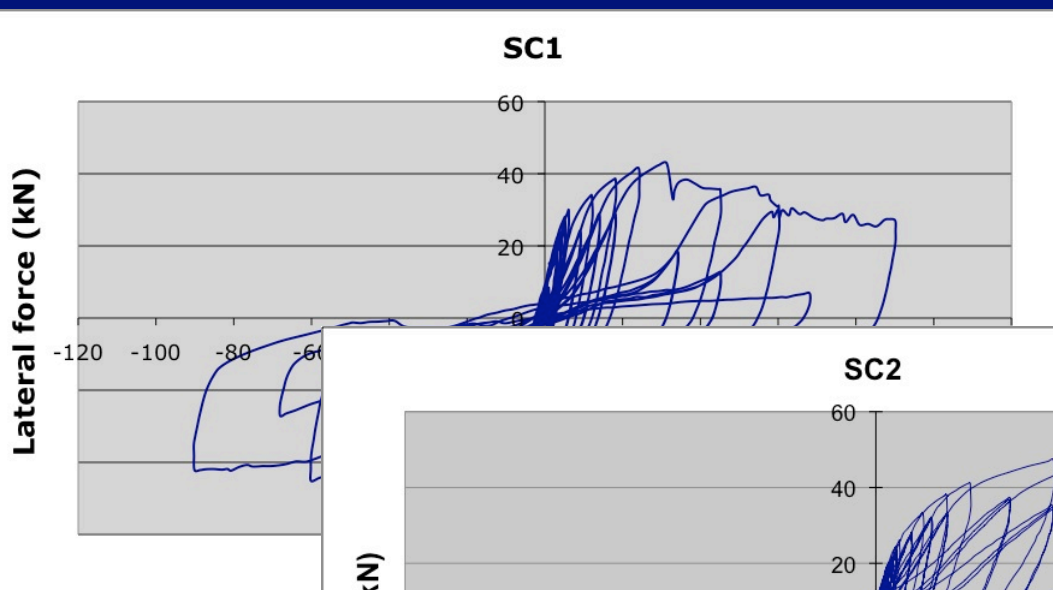
FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Investigação





# Investigação em curso

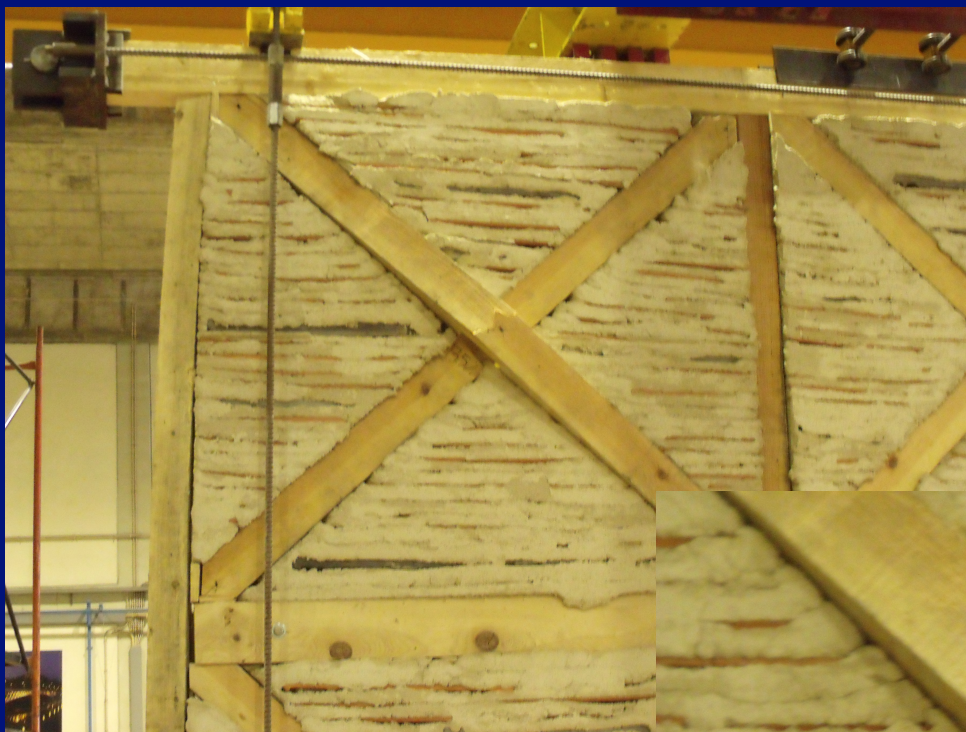
FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

**DECivil**

Investigação







INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Investigação

# DIAGONAL COMPRESSION TEST

Parede de argamassa  
de cal hidráulica



Parede de argamassa  
de cal aérea





INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Investigação

## MODO DE COLAPSO

Parede de argamassa  
de cal hidráulica



Parede de argamassa  
de cal aérea







INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Investigação

## COMPRESSION TEST

Parede de argamassa  
de cal hidráulica



Parede de argamassa  
de cal aérea





INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

**DECivil**

Investigação

More at:

**[www.severes.org](http://www.severes.org)**



# Regulamentação existente

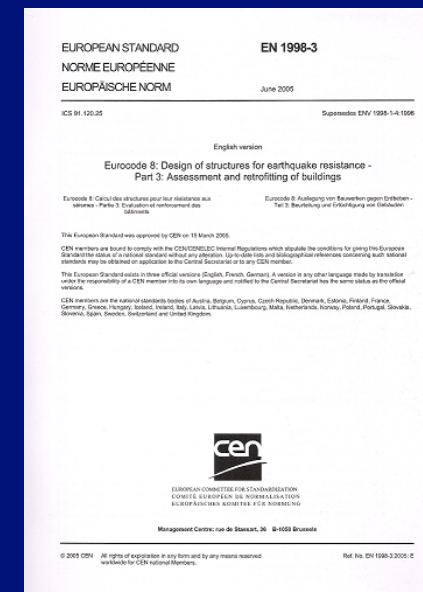
FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

- Legislação existente omissa quanto à obrigatoriedade do reforço sísmico em edifícios existentes;
- Regulamentos sísmicos estão vocacionados para novas construções;
- Encontra-se em fase de adopção o novo EC8 e da parte 3, que se reporta a edifícios existentes.





INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

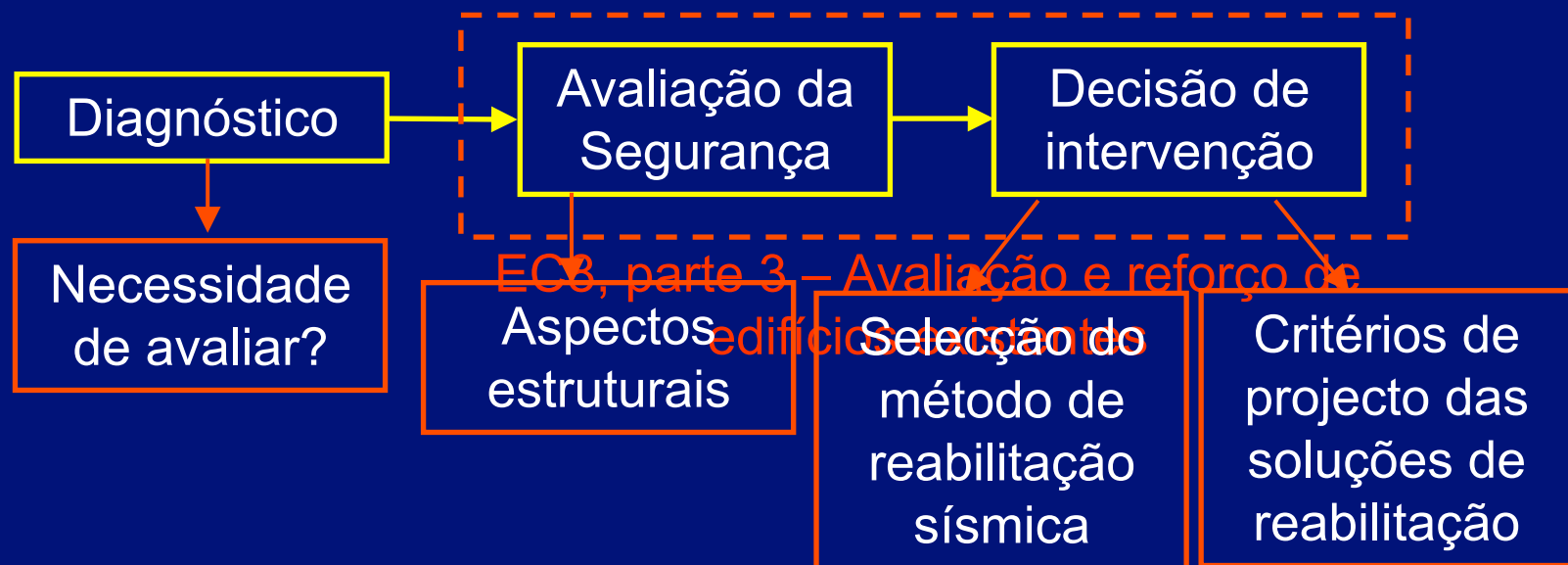
Regulamento Italiano. Regulamento de transição até à aplicação do EC8;

Documentos nos EUA. Várias entidades a produzir documentação. Plano de mitigação de risco sísmico existe desde 1970.





Etapas de estudo para um edifício existente,



É composto por um corpo de aplicação geral complementado com os anexos referentes a diferentes tipos de estruturas.

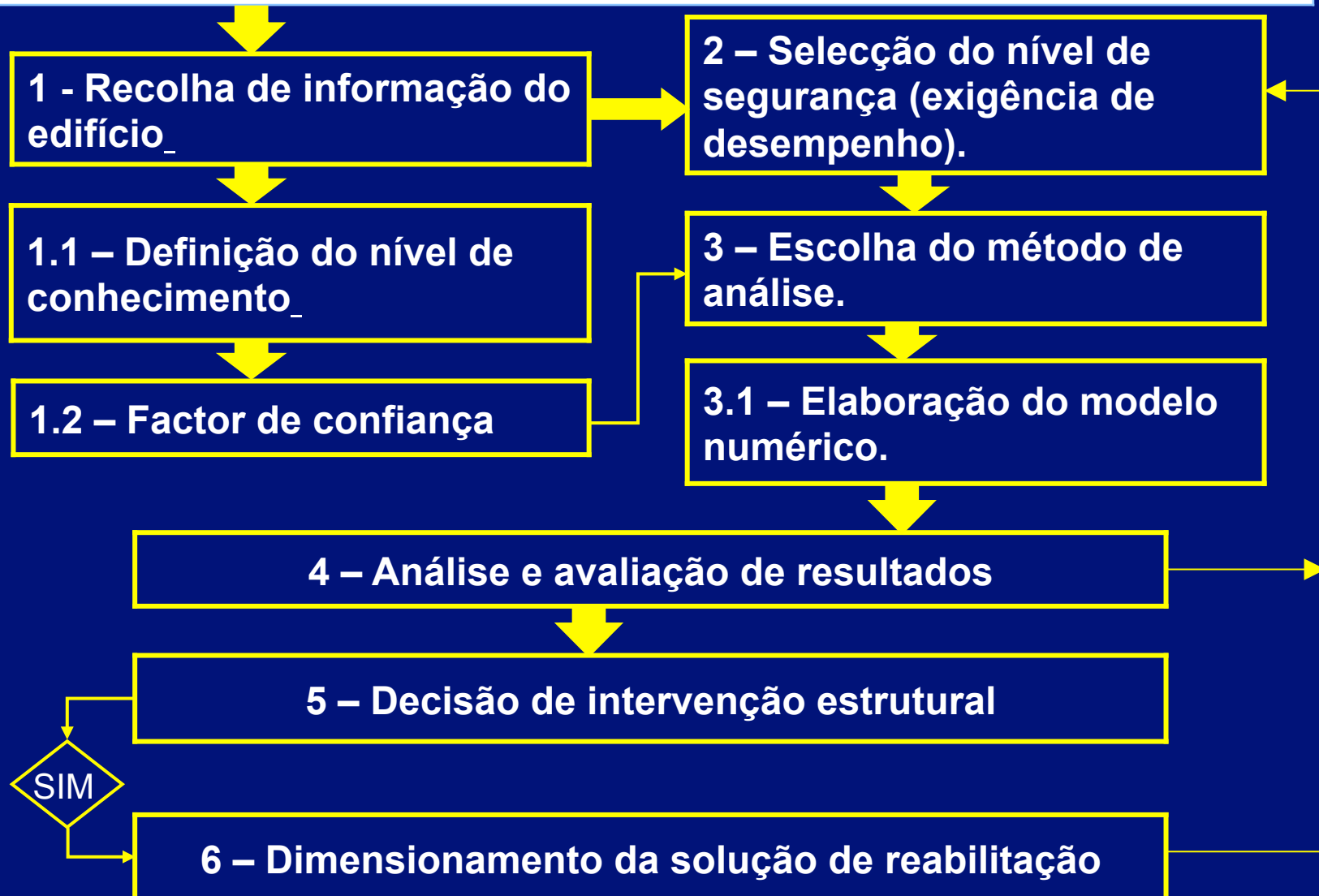
Anexo A – estruturas de betão armado

Anexo B – estruturas de aço

Anexo C – estruturas de alvenaria



## Metodologia para avaliação e reabilitação sísmica de um edifício existente

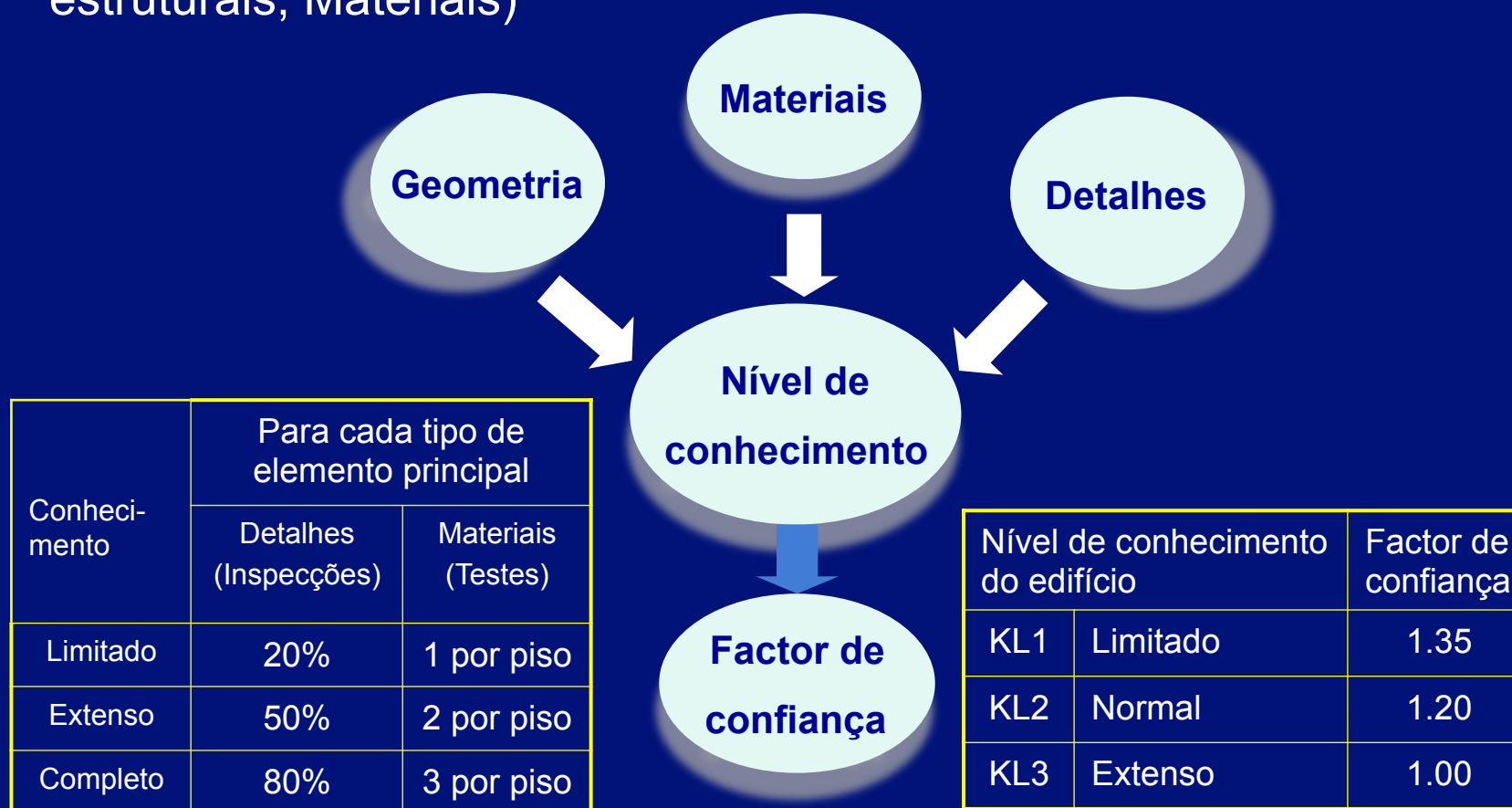






## 1 - Recolha de informação do edifício

- Informações de carácter geral e história do edifício
- Dados dos edifício (Geometria, Detalhes construtivos e estruturais, Materiais)



# Eurocódigo 8 – Parte 3

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

| Nível de conhecimento | Geometria                                                                                              | Detalhes                                                                                          | Materiais                                                                                        |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| KL1 - Limitado        | <i>Full survey</i><br>(exame total)<br><br>Ou<br><br>Desenhos originais de construção com exame visual | Inspecções limitadas <i>in situ</i><br><u>ou</u> Detalhes similares na época de construção        | Testes limitados <i>in situ</i> <u>ou</u><br>Valores usuais na época da constr.                  |
| KL2 - Normal          |                                                                                                        | Inspecções extensas <i>in situ</i><br><u>ou</u> Desenhos de constr. Incompletos + insp. limitadas | Testes extensos <i>in situ</i> <u>ou</u><br>Especificações do cálculo inicial + testes limitados |
| KL3 - Extenso         |                                                                                                        | Inspecções completas <i>in situ</i><br><u>ou</u> Desenhos de constr. Detalhados + insp. limitadas | Testes completos <i>in situ</i> <u>ou</u><br>Relatório de testes originais + testes limitados    |



## 2- Selecção do nível de segurança

A selecção do nível de segurança está relacionado com a definição da exigência de desempenho, que corresponde ao nível de danos máximo que se pretende que a estrutura apresente quando sujeita a um determinado nível de acção sísmica.

O nível de danos é garantido com a verificação de determinados estados limites.

| Estados Limite                                                   | Descrição                                                                                             | Acção sísmica                                        |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Estado Limite de Colapso Eminente<br>( <i>Near collapse</i> )    | Danos próximos do colapso. Exploração completa da capacidade de deformação dos elementos estruturais. | <u>2475 anos</u> , 2% de prob. de exceder em 50 anos |
| Estado Limite de Danos severos<br>( <i>Significant Damage</i> )  | Danos significativos. A estrutura ainda pode suportar acções sísmicas de intensidade moderada.        | <u>475 anos</u> , 10% de prob. de exceder em 50 anos |
| Estado Limite de Danos Limitados<br>( <i>Damage Limitation</i> ) | Danos ligeiros. Elem. estrut. mantém capacidades resistentes. A estrutura não necessita de reparação. | <u>225 anos</u> , 20% de prob. de exceder em 50 anos |



## 3 - Escolha do método de análise

### Métodos Lineares

Análise estática linear (**Forças laterais**);

Análise dinâmica linear - modal por espectro  
resposta elástico;

### Métodos Não lineares

Análise estática não linear (**Pushover**);

Análise dinâmica não linear (**Time history**);

Recurso ao coeficiente de comportamento (***q-factor approach***) com análises  
lineares (espectro de resposta reduzido).

Linear vs. Não linear ?

Estática vs. Dinâmica?

# Eurocódigo 8 – Parte 3

FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas  
tendo em conta a Acção Sísmica



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

| Método de análise                             | Modelação da acção sísmica                                                                               | Condições de aplicabilidade                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Análise estática linear<br>(Forças laterais)  | Espectro de resposta elástico $S_e(T)$ ,<br>definido no EC8 – parte 1, secção<br>3.2.2.2.                | i. Critérios dados pelo EC8 – parte 1 relativamente às análises lineares (4.3.3.2 para forças laterais ou 4.3.3.3 para análise modal)                                                                                                                 |
| Análise modal por espectro resposta           |                                                                                                          | ii. $\rho_{max} / \rho_{min} < 2,5$<br>em que $\rho_{max}$ e $\rho_{min}$ são os valores máximos e mínimos de $\rho_i = D_i/C_i$ , para todos os elementos dúcteis em que $\rho_i > 1$ .<br>iii. Capacidade > Efeitos, em todos os elementos frágeis. |
| Análise estática não linear<br>(Pushover)     | Espectro de resposta elástico $S_e(T)$ ,<br>definido no EC8-parte 1, 3.2.2.2.                            | i. Caso não se verifiquem os critérios para a utilização das análises elásticas.                                                                                                                                                                      |
| Análise dinâmica não linear<br>(Time history) | Acelerogramas.                                                                                           | ii. Critérios dados pelo EC8 – parte 1 relativamente às análises não lineares.                                                                                                                                                                        |
| q-factor approach                             | Espectro de resposta de projecto $S_d(T)$ , para análise elástica, de acordo com EC8 - parte 1, 3.2.2.5. | Critérios dados pelo EC8 - parte 1 relativamente às análises lineares (4.3.3.2 para forças laterais ou 4.3.3.3 para análise modal)                                                                                                                    |

Prática corrente  Métodos Lineares

- + simples
- + rápidos
- + conhecidos
- Capacidade computacional





### Aplicabilidade de métodos lineares

#### No geral:

- Critérios de regularidade em planta e altura (EC8, parte1);
- Condições complementares indicadas no quadro anterior.

#### Em particular para edifícios de alvenaria:

- **Pisos a funcionarem como diafragmas** (não se verifica para a grande maioria dos edifícios existentes de alvenaria);
- Pisos em faces opostas de uma parede comum encontram-se à mesma cota;
- Em cada piso, o coeficiente entre a rigidez lateral da parede principal mais rígida e a parede principal mais fraca não excede 2,5.



### 3.1 – Elaboração do modelo numérico

- Simular características e comportamento estrutural real;
- Nível de conhecimento - para KL1 – Modelo Linear;
- Regularidade em planta – possível modelos planos;
- Efeitos de torção;
- Elementos Secundários;
- Valores médios para as propriedades dos materiais;
- Paredes de alvenaria – considerar  $\frac{1}{2}$  rigidez elástica



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

DECivil

Análise de  
resultados

## 4 - Análise e avaliação de resultados

- Resultados obtidos da análise efectuada ao modelo numérico;
- Redistribuição de esforços quando possível e necessário;
- Ajustes nos resultados dependendo do estado Limite a verificar.

Verificações de segurança

Exigências < Capacidades

Estrutura  
no Global

- Controle de deslocamentos globais;
- Controle de corte na base.

Elementos  
Particulares

- Controlo de rotações e deslocamentos relativos;
- Controlo de tensões.



## Verificação da segurança em edifícios de alvenaria existentes

| Estado Limite          | Verificações necessárias                          | Critérios                     |                                                       |
|------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------|
|                        |                                                   | Exigências < Capacidades      |                                                       |
|                        |                                                   | Exigências                    | Capacidade resistente                                 |
| De Colapso<br>Eminente | Estrutura global                                  | Deslocamento no topo do edif. | Deslocamento último (1)                               |
|                        | Em paredes de alvenaria<br>caso $V_{EM} < V_{FV}$ | Deslocamentos nas paredes     | $Drift = 4/3 \times 0,008H_0/D$ (elem. primários) (2) |
|                        | Em paredes de alvenaria<br>caso $V_{EM} > V_{FV}$ |                               | $Drift = 4/3 \times 0,012H_0/D$ (elem. secundários)   |
| De Danos<br>Severos    | Estrutura global                                  | Deslocamento no topo do edif. | $Drift = 4/3 \times 0,004$ (elem. primários)          |
|                        | Em paredes de alvenaria<br>caso $V_{EM} < V_{FV}$ | Deslocamentos nas paredes     | $Drift = 4/3 \times 0,006$ (elem. secundários)        |
|                        | Em paredes de alvenaria<br>caso $V_{EM} > V_{FV}$ |                               |                                                       |
| De Danos<br>Limitados  | Estrutura global                                  | <u>Análise linear</u>         |                                                       |
|                        |                                                   | Esforços de corte na base     | Resistência ao corte na base (total)                  |
|                        |                                                   | <u>Análise não linear</u>     |                                                       |
|                        | Em paredes de alvenaria<br>caso $V_{EM} < V_{FV}$ | Deslocamento no topo do edif. | Deslocamento de cedência (3)                          |
|                        |                                                   | Deslocamentos nas paredes     | $Drift = 0,008H_0/D$ (elem. primários)                |
|                        |                                                   |                               | $Drift = 0,012H_0/D$ (elem. secundários)              |
|                        | Em paredes de alvenaria<br>caso $V_{EM} > V_{FV}$ |                               | $Drift = 0,004$ (elem. primários)                     |
|                        |                                                   |                               | $Drift = 0,006$ (elem. secundários)                   |



### 5 - Decisão de intervenção estrutural

#### Influenciada por:

- ✖ Tipo e nível de danos iniciais apresentado pela estrutura;
- ✖ Resultado da avaliação sísmica efectuada;
- ✖ Relação Custo-Benefício da intervenção em termos económicos, sociais, tempo de interrupção de utilização durante intervenção.

#### Critérios técnicos para a escolha:

- ✖ Corrigir os maiores problemas (danos);
- ✖ Melhorar a regularidade em planta e altura;
- ✖ Aumentar a Ductilidade local ou global;
- ✖ Aumentar a resistência local ou global, sem diminuir a ductilidade global.





### 6 - Dimensionamento da solução de reabilitação

Deve incluir os seguintes passos:

1. Concepção → Da solução de reparação e/ou reforço
2. Análise → Com execução de modelo numérico e escolha de método de análise
3. Verificações → Da segurança para a estrutura no Global e para os Elementos isolados

**No Anexo C do EC8 é apresentada uma listagem de soluções de reforço com uma abordagem qualitativa.** Permite uma visão alargada das diversas técnicas de intervenção. Esta listagem pode ser vista como uma base de trabalho não invalidando outras soluções, que melhor se adequam ao caso de estudo. De facto novas soluções são continuamente estudadas e aplicadas ao longo dos anos.



## Comentários:

Nível de conhecimento KL1  $\Rightarrow$  Só Análises Lineares

Pavimentos de madeira  $\Rightarrow$  Piso flexível  $\Rightarrow$  Só Análises não lineares

Edifícios antigos com pavimentos de madeira

Obrigatoriamente Análises não Lineares

Nível de conhecimento KL2 ou KL3

Maior nº de testes *in situ*

Mais caro  
Maiores danos  
impostos



**OPCM 3274 de Maio de 2003** - “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sísmica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sísmica”

**OPCM 3431 de Maio de 2005** - “Ulteriori modifiche ed integrazioni all'Ordinanza n.3274 del 20/3/2003”.

Novo Regulamento Sísmico, documento de transição até a aplicação final do EC8 em Itália.

Baseado no EC8, remete para o capítulo 11 a avaliação e reforço de edifícios existentes.

Apresenta um anexo com elementos de cálculo complementares.



## Alteração na necessidade de avaliar e na definição da acção sísmica

1) Ao contrário do EC8, define as condições que implicam a obrigatoriedade de aplicar o código:

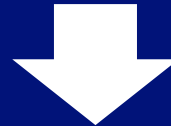
- Aumento do edifício em altura ou em planta;
- Alteração do tipo de utilização do edifício, decorrente da intervenção, que envolva o aumento das cargas iniciais (permanentes e variáveis);
- A execução de intervenções estruturais com vista a transformar o edifício noutro diferente do original;
- A execução de intervenções estruturais que envolvam alterações substanciais no comportamento global do edifício (renovações, substituições de partes estruturais, etc.).

2) Para intervenções de reabilitação e de reforço que reduzam a vulnerabilidade, a acção sísmica pode ser reduzida até 65% da acção usada para estruturas novas.



## Alteração na recolha de informação e níveis de conhecimento

- ~~Testes Limitados *in situ*~~  Levantamento Limitado *in situ*
- Características mecânicas dos materiais



Tabelas

- Dados experimentais de outros edifícios



Correspondência entre materiais  
e detalhes do edifício em estudo





## Alteração no coeficiente de comportamento

Edifícios de alvenaria não reforçada ;

regular em elevação  $q = 2,0$   $\alpha_u/\alpha_1 = 2,8$  → 1,5 a 2,5

não regular em elevação  $q = 1,5$   $\alpha_u/\alpha_1 = 2,7$  → 1,5 a 2,0

EC8, parte 1

Em que  $\alpha_u/\alpha_1$  é o OSR (coeficiente de sobrerresistência), para o qual são sugeridos os seguintes valores:

- Edif de alvenaria não reforçada de um piso  $\alpha_u/\alpha_1 = 1,4$
- Edif de alvenaria não reforçada de dois ou mais pisos  $\alpha_u/\alpha_1 = 1,8$

EC8, parte 3 não dá indicação do valor de  $q$   
a considerar para edifícios de alvenarias.

EC8, parte 1 não dá valores de  $\alpha_u/\alpha_1$  para  
edifícios de alvenaria



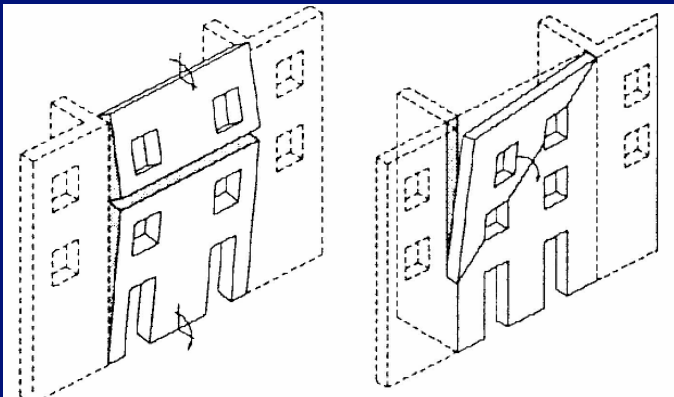
## Alteração na verificação da segurança

Considera somente dois Estados Limite:

- Estado Limite Último = Estado Limite de Danos Severos (EC8, parte 3)
- Estado Limite de Danos = Estado Limite de Danos Limitados

A avaliação da segurança é feita separadamente para acções no plano e fora do plano. **No plano**, tal como no EC8, considera 2 tipos de mecanismos de rotura: ao corte e à flexão

**Fora do plano**, considera a formação de um mecanismo de colapso local:



Verificação do primeiro modo de colapso – mecanismo local de rotura para fora do plano (anexo 11C);



**Standard ASCE/SEI 31-03, Seismic Evaluation of Existing Building** que apresenta critérios e procedimentos para a avaliação sísmica de estruturas existentes,

**Standard ASCE/SEI 41-06, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings** para a reabilitação dos edifícios existentes à acção sísmica,

Documento **FEMA 547, Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings** que apresenta uma compilação de técnicas de reabilitação sísmica incluindo pormenores, detalhes e indicações práticas bem como indicações sobre as técnicas adequadas para mitigar tipos específicos de anomalias em vários tipos de estruturas.



Seguem uma filosofia baseada no desempenho da estrutura.

Apresentam os conceitos:

Objectivo de Reabilitação = Desempenho do edifício

+

Acção sísmica

Desempenho do edifício ou estado de danos que depende de:

- a) segurança dos ocupantes do edifício durante e após o sismo;
- b) custo e exequibilidade de repor o edifício nas condições existentes antes do sismo;
- c) o período de tempo durante o qual o edifício se encontra fora de serviço para efeitos de reabilitação e
- d) efeitos na comunidade em termos económicos, arquitectónicos ou históricos

Relações Custo-Benefício que podem ser a base de um programa de mitigação de risco sísmico.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

**DECivil**

- Adopção do EC8 – ANEXOS NACIONAIS;
- Metodologia do EC8 com alguns problemas. Devem ser resolvidos na elaboração dos Anexos Nacionais;
- Aprender com a evolução do Regulamento Italiano;
- Introduzir alguns conceitos dos Documentos Americanos (e.g. relações C-B, essenciais para a definição de um programa de mitigação de risco sísmico nacional);
- Adequar EC8 à realidade Nacional, tendo em conta as tipologias construtivas;
- Focar a Questão do efeito do Quarteirão e dos edifícios Mistos.





INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

**DECivil**

## Referência Sugerida:

CASANOVA, S.; BENTO, R.; LOPES, M. **2011**: “Comparação de Regulamentação sobre Avaliação e Reforço Sísmico de Edifícios Antigos de Alvenaria”, **Revista Internacional Construlink (RIC)**, nº **26**, Vol. **9**, 48-63.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

**DECivil**

# CONCEPÇÃO, MODELAÇÃO ESTRATÉGIAS DE REFORÇO E ANÁLISE SÍSMICA DE ESTRUTURAS ANTIGAS

Rita BENTO e Mário LOPES

IST, Lisboa, Maio 2011