



TÉCNICO  
LISBOA

# Avaliação Sísmica e Reforço de Edifícios Antigos de Alvenaria

## Parte 1 - Introdução

Rita Bento

6 de Junho de 2013

FUNDEC



TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

## Contexto

---

- A necessidade de investir em reabilitação urbana é, nos dias de hoje, um tema da maior importância e actualidade para o nosso País.
- De facto, nas futuras iniciativas de reabilitação urbana, que se espera virem a revitalizar o sector da construção civil, e de acordo com a recente lei 32/2012 (art.ºs 51, 53 e 77), esse aspecto não pode ser negligenciado e serão necessários estudos de avaliação sísmica dos edifícios existentes que permitam a definição adequada de soluções de **reforço**.
- Avaliação e Reforço Sísmico
- Formação – Novos processos de avaliação sísmica baseados em critérios de desempenho.
- Importância da abordagem destes procedimentos: projeto e investigação.



TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

# Investigação – Projecto FCT em curso

<http://www.severes.org/>

## SEISMIC VULNERABILITY of Old Masonry Buildings

HOME

PROJECT

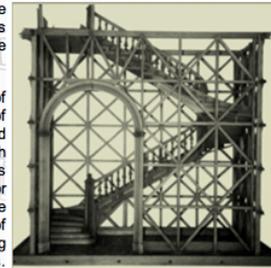
DISSEMINATION

NEWS

### Summary

This project addresses the seismic hazard, the vulnerability it poses to old masonry structures (especially to Pombalino buildings) and possible retrofitting solutions.

A main concern will be the development of fragility curves based on the definition of classes of constructions for Lisbon's old masonry buildings. The development of such curves is essential as input for any loss estimation model currently being developed for the site. For such aim, analytical models will be developed of the representative construction of each class based on state of the art modelling approaches appropriate for masonry structures. Non-linear behaviour of masonry will be taken into account by running both non-linear static and dynamic analyses.



Experimental testing on relevant structural elements is also proposed given the relatively scarce knowledge and data existing on the seismic behaviour of the typical masonry constructions existing in Lisbon. Wall and pier specimens will be tested under static cyclic and monotonic horizontal loading, the obtained results will enable structural characterization of the specimens, the identification of expected failure modes and the calibration of the developed analytical models. Furthermore, retrofitting schemes will be discussed with the most interesting ones being incorporated into the analytical models.

The project is counting with the advice of known national and international experts on the field of earthquake engineering: Sergio Lagomarsino (from Genoa University), Andreas Kappos (from Aristotle Technical University of Thessaloniki), Carlos Sousa Oliveira (from IST) and Artur Vieira Pinto (from JRC and with a background on experimental activities).

### Latest News

22/05/2013 - [Training Course](#)

10/10/2011 - [Seminar](#)

09/09/2011 - [Research Grant](#)

**FCT**  
Fundação para a Ciência e a Tecnologia

**ICIST**

INSTITUTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS, TERRITÓRIO E CONSTRUÇÃO

All rights reserved © ICIST 2010



TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

## Objectivos

- Definir a vulnerabilidade sísmica dos edifícios antigos de alvenaria da cidade de Lisboa: Pombalinos, Gaioleiros e de Placa.

### ‘Pombalino’

(after 1755)



- Construção depois do **Sismo 1755**
- Paredes exteriores de Alvenaria de Pedra e pisos de madeira
- **Paredes do interior estruturais com madeira-alvenaria**

### ‘Gaioleiro’

(1880-1940)



- **Edifícios mais altos com** paredes exteriores de Alvenaria de Pedra e pisos de madeira
- **Paredes do Interior de Alvenaria de tijolo**

### ‘Placa’

(1940-1960)



- Paredes exteriores de alvenaria de pedra, blocos de cimentos e pisos de madeira e de **betão armado**
- Pórticos de **betão armado**, principalmente nas traseiras dos edifícios



TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

## Objectivos

---

- Definir a vulnerabilidade sísmica dos edifícios antigos de alvenaria da cidade de Lisboa: Pombalinos, Gaioleiros e de Placa.
- Identificar as características geométricas/estruturais dos diferentes tipos de edifícios
- Realizar trabalho experimental, laboratorial e *in-situ*, de forma a caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais e o comportamento cíclico de alguns elementos estruturais
- Desenvolver modelos analíticos, alguns que permitam simular de forma adequada o comportamento não linear dos elementos estruturais, e realizar análises estáticas não lineares.



TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

## Objectivos

---

- Um objectivo principal do projecto é a obtenção de **curvas de fragilidade sísmica**, em função dos diferentes tipos de edifícios antigos de alvenaria de Lisboa. As curvas assim obtidas poderão ser posteriormente utilizadas pela comunidade científica e técnica como dado nos modelos de risco sísmico e perdas associadas.
- Os estudos analíticos/numéricos permitem identificar as zonas de maior fragilidade e propor soluções de reforço.

## Estrutura do Curso

---

1. Apresentação – Avaliação sísmica de edifícios antigos de alvenaria – Introdução.
2. Trabalho experimental – Regulamentação e Testes *in-situ*.
3. Trabalho experimental – Ensaios de Laboratório.
4. Avaliação Sísmica: Problemas particulares da modelação de edifícios antigos – modelação linear.
5. Modelação Não Linear de Edifícios
6. Reforço Sísmico de edifícios antigos de alvenaria. Casos de estudo.
7. *Performance based assessment of ancient masonry buildings: presentation of PERPETUATE procedure and application to case studies*
8. Debate.

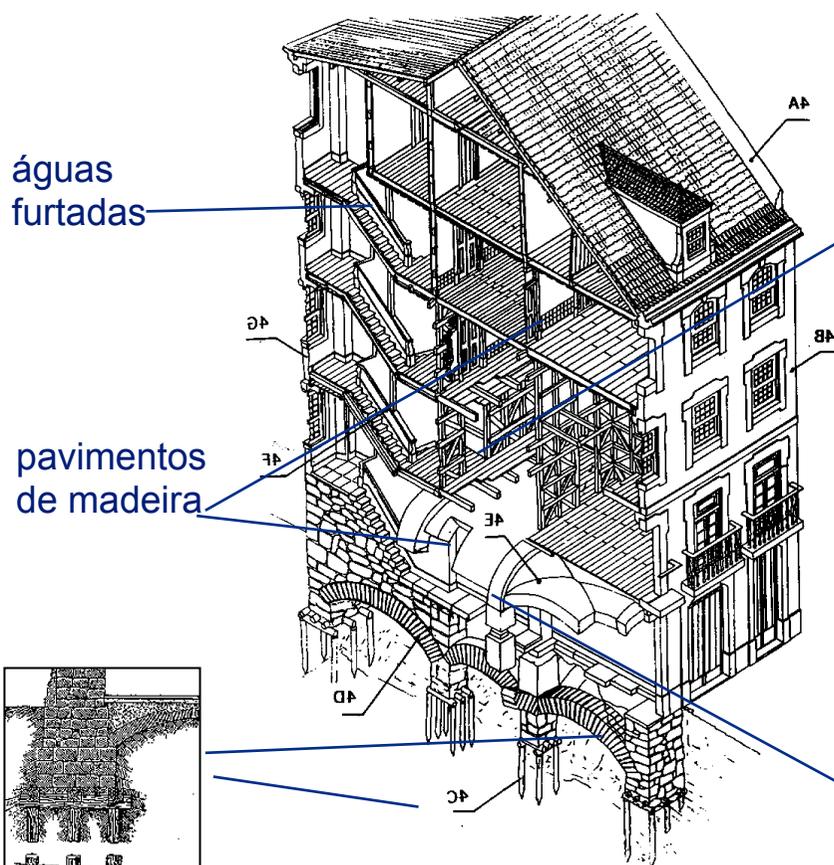


TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

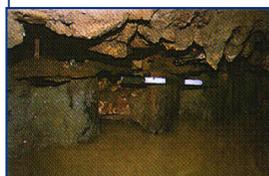
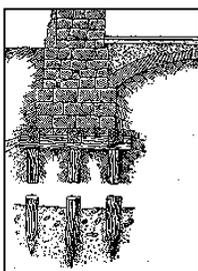
# • Pombalinos

## Tipos de Edifícios



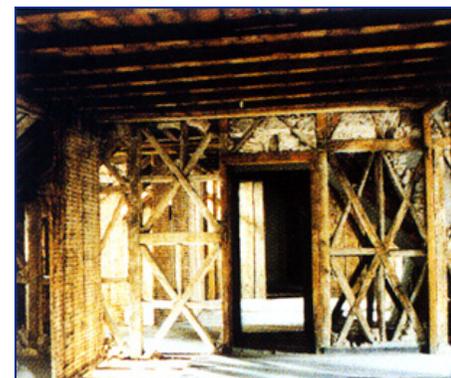
águas  
furtadas

pavimentos  
de madeira



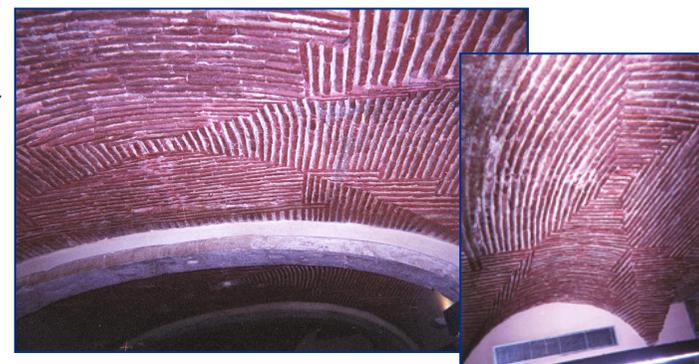
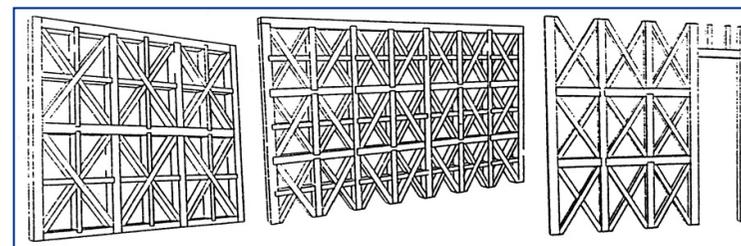
Fundações indirectas  
através de estacas  
curtas de pequeno  
diâmetro

Abóbadas de  
alvenaria de  
blocos cerâmicos  
e arcos de pedra



paredes  
interiores  
de frontal

Cruzes de Santo André  
com várias geometrias possíveis





TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

## Tipos de Edifícios

### Gaioleiros

- Expansão Urbana de Lisboa, no fim do século XIX, princípio de XX (depois dos Pombalinos).
- Localização: Av. Liberdade, Almirante Reis 'Avenidas Novas' junto à Fontes Pereira de Melo e Av. República
- Fachadas tipo:





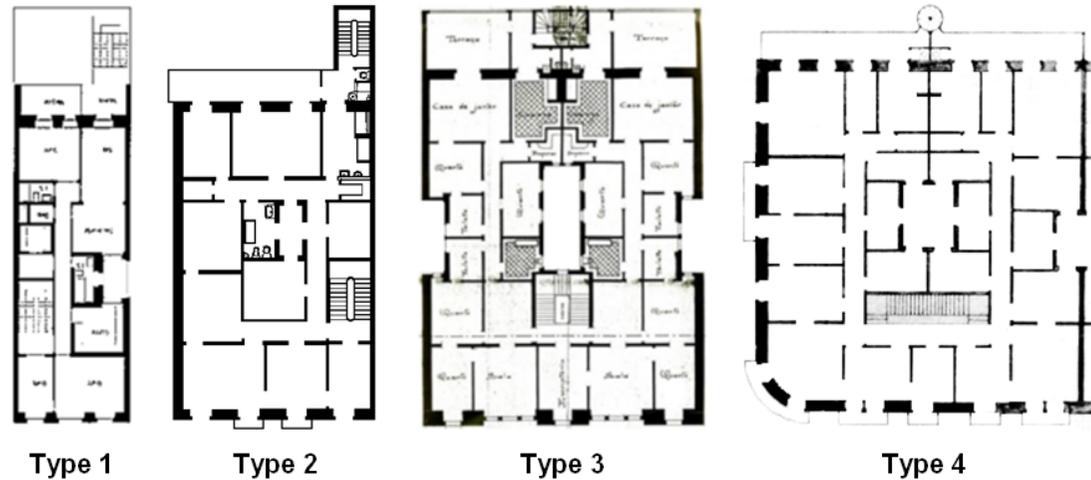
TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

## Tipos de Edifícios

### Gaioleiros

- Expansão Urbana de Lisboa, no fim do século XIX, princípio de XX (depois dos Pombalinos).
- Localização: Av. Liberdade, Almirante Reis 'Avenidas Novas' junto à Fontes Pereira de Melo e Av. República
- Tipos de plantas:

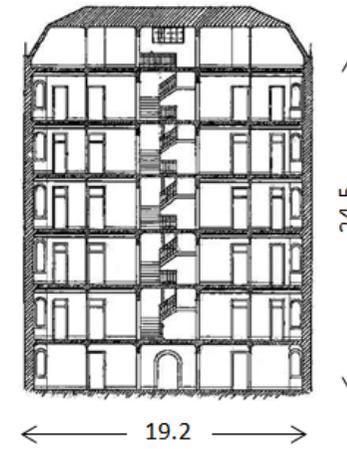
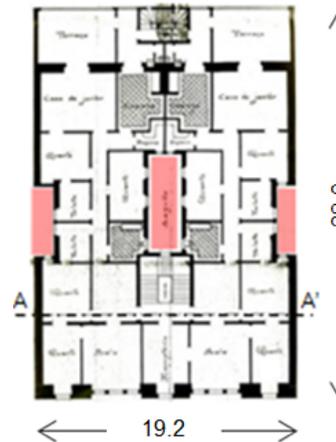




TÉCNICO  
LISBOA

- Gaioleiros

## Tipos de Edifícios



- Exterior - Traseiras:



- Número de pisos: 5-8

FUNDEC



TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

## • Gaioleiros

## Tipos de Edifícios

---

- Paredes Exteriores:
  1. Fachadas em pedra irregular e argamassa de cal aérea.
  2. Empenas em alvenaria de pedra irregular ou em tijolo com espessura constante
- Paredes Interiores:
  1. Paredes de alvenaria de tijolo (sólido e furado) com diminuição da espessura em altura
  2. Paredes de tabique
- Pisos de madeira, flexíveis



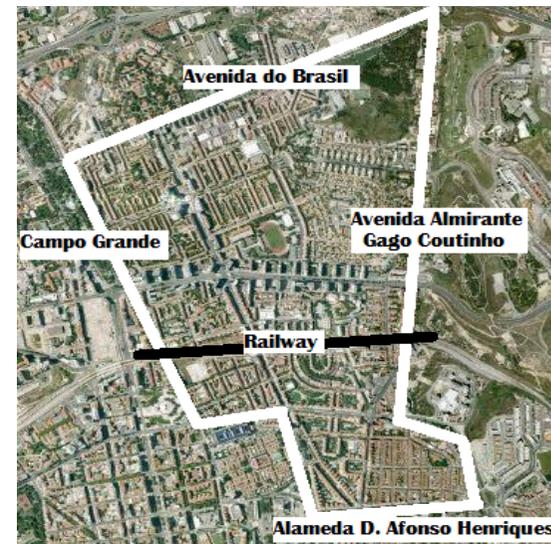
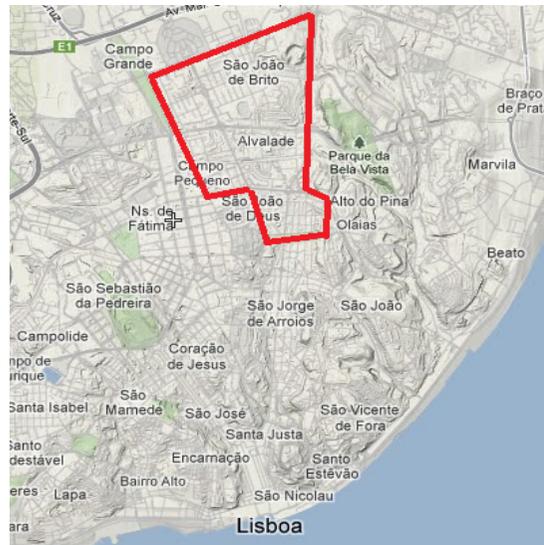
TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

- Placa

## Tipos de Edifícios

- Localização



Bairro de Alvalade e área entre a linha de caminho de ferro e a Alameda D. Afonso Henriques



TÉCNICO  
LISBOA

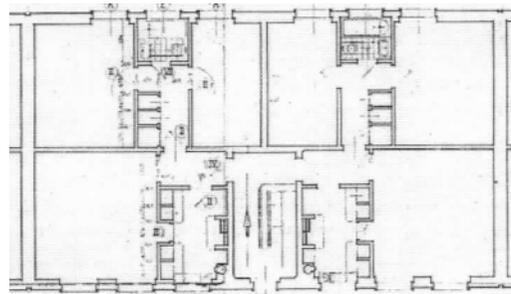
FUNDEC

- Placa

## Tipos de Edifícios

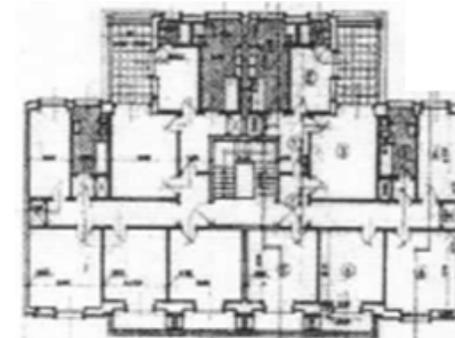
- Localização
- Tipo de Plantas

Planta Rectangular



Bairro de Alvalade

'Rabo de Bacalhau'



Área entre a linha de caminho de ferro e a Alameda D. Afonso Henriques



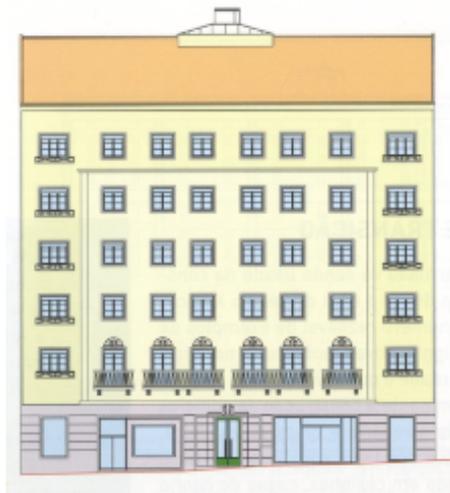
TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

- Placa

## Tipos de Edifícios

- Localização
- Tipo de Plantas
- Tipo de Fachadas



Pisos: de 4 a 6 e pé-direito = 3 m

Gaioleiro



TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

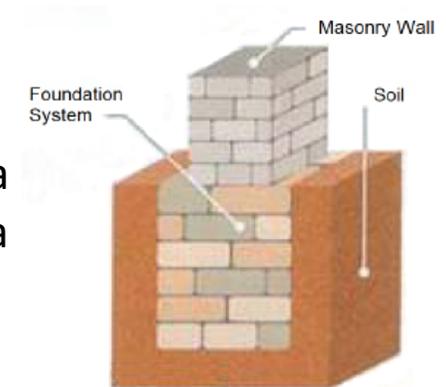
- Placa

## Tipos de Edifícios

Alvenaria de  
pedra com  
argamassa de  
cal hidráulica

Profundidade  
Mínima de  
0,30m e 0,5m  
até rocha

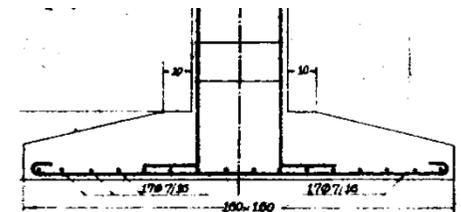
A fundação  
funciona como  
parede continua  
que aumenta na  
fundação



### Fundações

Betão  
Armado

Primeiras  
fundações de  
pilares de BA





TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

- Placa

## Tipos de Edifícios

|                           |   |                                  |  |
|---------------------------|---|----------------------------------|--|
| <b>Paredes Exteriores</b> | Alvenaria de <b>pedra irregular</b>                       | Espessura varia de 0,4 a 0,7m    | Por vezes a espessura diminui em altura        |
|                           | Blocos de <b>cimento</b> (empenas)                        | Espessura varia de 0,3 a 0,4m    |  |
| <b>Paredes Interiores</b> | Alvenaria de <b>tijolo</b> ou de blocos de <b>cimento</b> | Espessura varia de 0,15 a 0,25 m | Tijolo pode ser <b>maciço</b> ou <b>furado</b> |





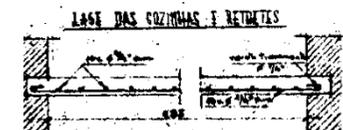
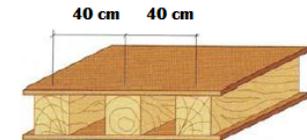
TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

- Placa

## Tipos de Edifícios

|                         |               |  |   |
|-------------------------|---------------|--|---|
| <b>Pisos</b>            | Madeira       | Vigas 0,08m x 0,18m espaçadas 0,4m . Espessura total 0,30m | O Piso de madeira apoia diretamente nas paredes exteriores e interiores   |
|                         | Betão Armado  | Espessura varia de 0,07 a 0,10m                            | As lajes apoiam-se nas paredes de alvenaria e têm apenas armadura positiva. Primeiro são introduzidas apenas na zona de serviço e depois no piso todo |
| <b>Escada principal</b> | BA ou Madeira |  | Normalmente no meio do edifício   |





TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

- Placa

## Tipos de Edifícios

### Escadas de Serviço

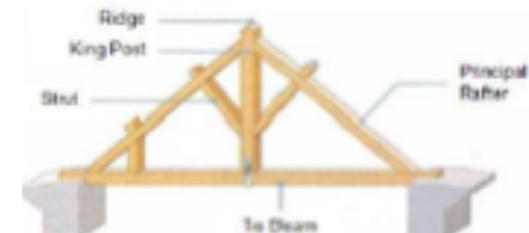
BA ou metálicas

Na parte de trás do edifício



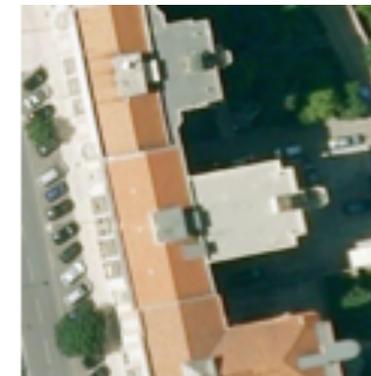
### Cobertura

Estrutura de Madeira e telhas cerâmicas



BA

Cobertura horizontais, formando terraços, nos edifícios de 'Rabo de Bacalhau'





TÉCNICO  
LISBOA

# Avaliação Sísmica – Métodos de Análise

## Análises Elásticas-Lineares

- Análises Estáticas Equivalentes
- Análises Dinâmicas Modais, por Espectros de Resposta

## Análises Não-Lineares

- Análises Estáticas Não-Lineares
- Análises Dinâmicas Não-Lineares

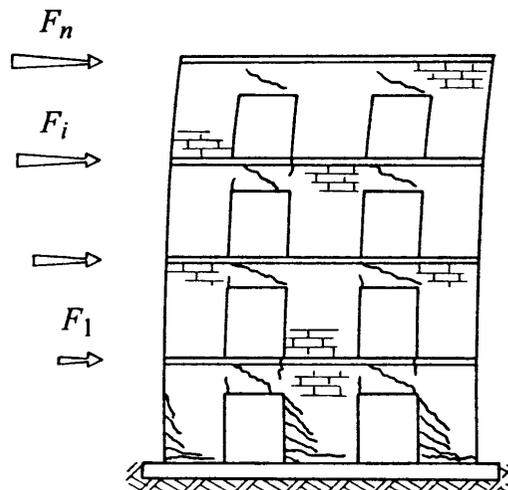
**Regulamentos  
Sísmicos**

**FUNDEC**

## Avaliação Sísmica – Métodos de Análise

As **análises dinâmicas não** lineares são mais correctas em termos de resultados, no entanto, são morosas e requerem a selecção de acelerogramas como *input*, para além de um analista/engenheiro com boa formação e capacidade de entender os resultados.

As **análises estáticas não** lineares são um caso intermédio e aceitável para avaliar estruturas de alvenaria.



- Imposição de incrementos monotónicos de força horizontal à estrutura.
- Resposta traduzida em curvas de **capacidade** que relacionam a força de corte basal com o deslocamento horizontal observado num ponto de controlo (usualmente coincidente com o CM do último piso).



TÉCNICO  
LISBOA

## Avaliação Sísmica – Modelos Numéricos

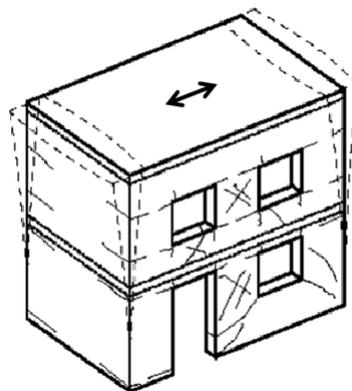
- A observação de danos em estruturas de alvenaria mostra que a avaliação do desempenho sísmico pode ser feito a partir de dois modelos:

### Resposta Global

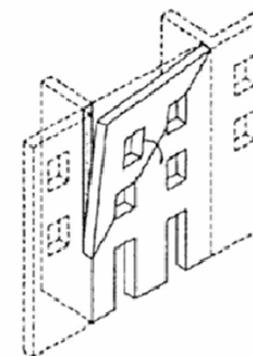
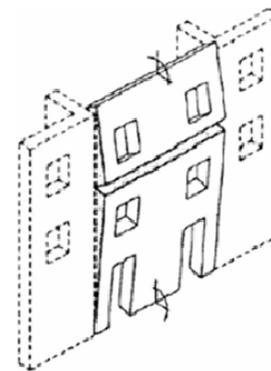
Comportamento no plano das paredes e ligações  
Capacidade de transferência de carga dos pisos

### Resposta Local

Normalmente relacionada com o comportamento para fora do plano das paredes



Resposta Global



Resposta Local

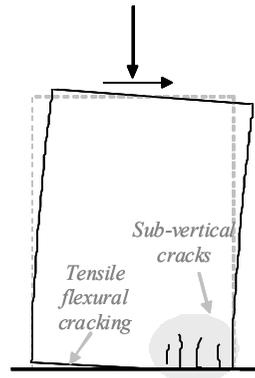
FUNDEC



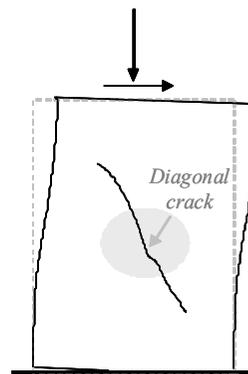
TÉCNICO  
LISBOA

# Avaliação Sísmica – Modelos Numéricos

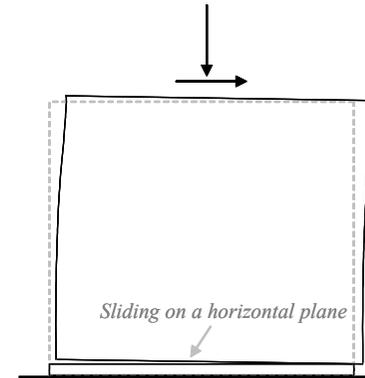
## Modos de Colapso no Plano



**Rotura por Flexão**  
Derrubamento  
Esmagamento



**Rotura por Corte**  
Fendilhação Diagonal



**Rotura por Corte**  
Deslizamento



FUNDEC

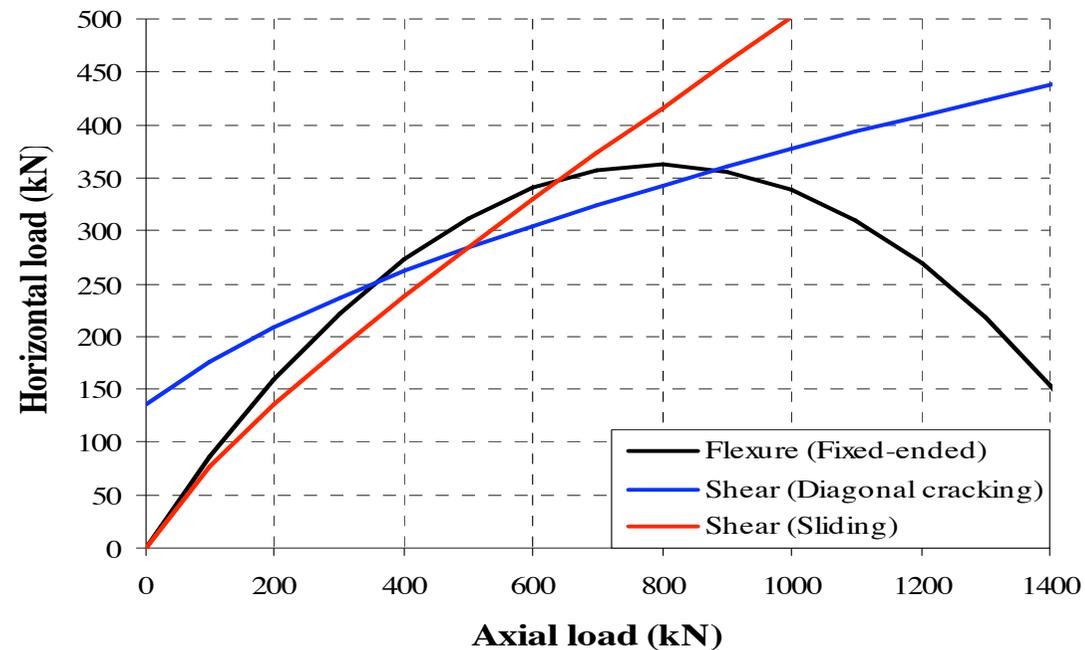


TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

## Avaliação Sísmica – Modelos Numéricos

### Influência da força axial nos modos de rotura



Para níveis elevados de força axial, a flexão domina a resposta!

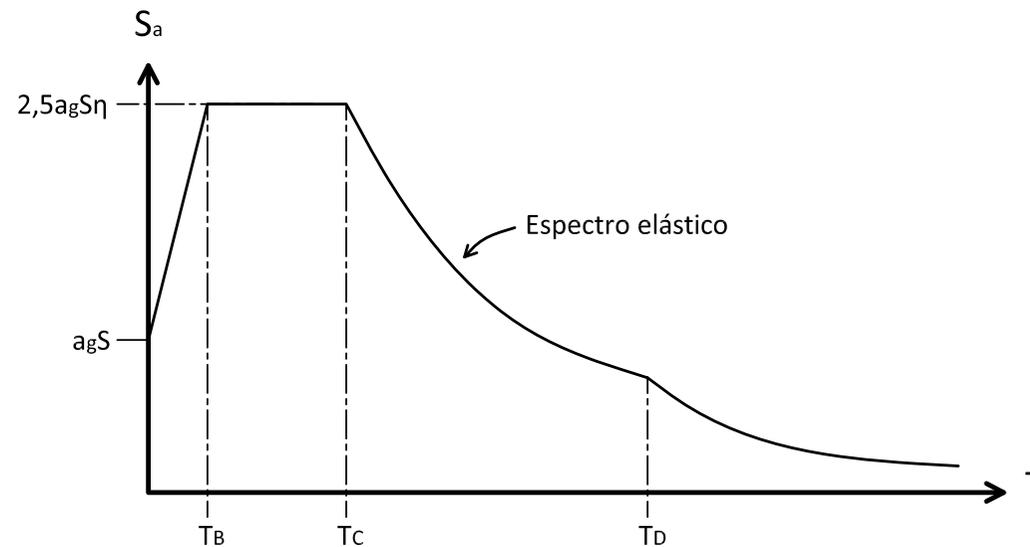


- **Descrição do método passo-a-passo:**

- Passo1 – Dados

- a. Estrutura

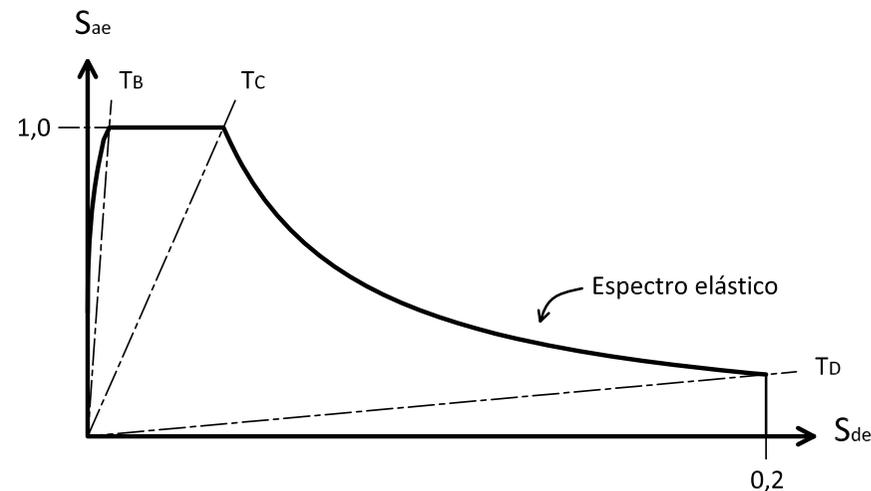
- b. Espectro de resposta elástico,  $S_{ae}$



- **Descrição do método passo-a-passo:**

- Passo2 – Espectro de Resposta no Formato Aceleração-Deslocamento espectral (ADRS)

Espectro Elástico 
$$S_{ae} = \frac{4\pi^2}{T^2} S_{de}$$



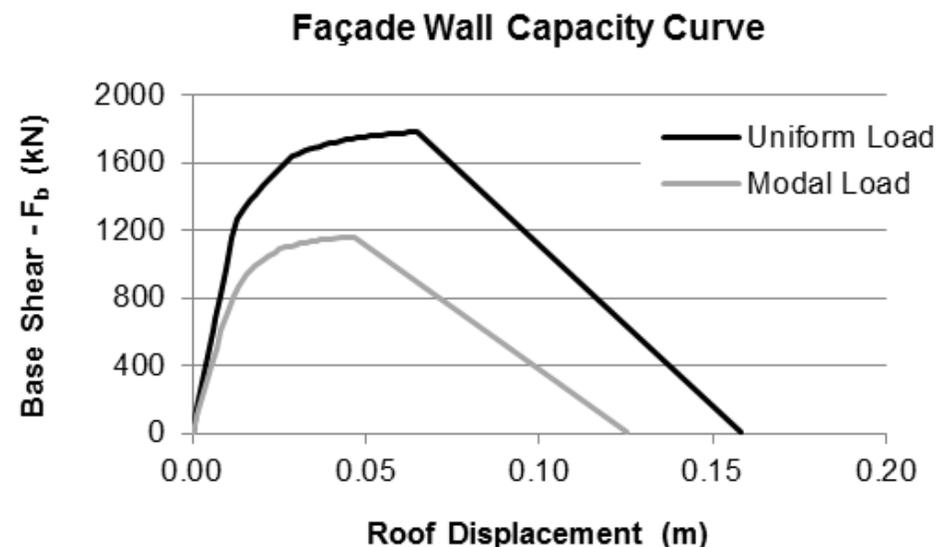


TÉCNICO  
LISBOA

- **Descrição do método passo-a-passo:**

- Passo 3 – Definição da curva de capacidade resistente

- a. Definir uma distribuição de forças, onde a força lateral  $P_i = p m_i \phi_i$
- b. Determinar a relação não linear Corte basal (V) - deslocamento de topo ( $\Delta_{\text{topo}}$ )

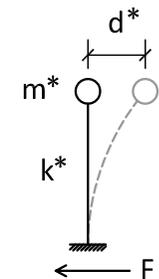


• **Descrição do método passo-a-passo:**

- Passo 4 – Sistema 1 GL equivalente

Conversão

- Determinar massa  $m^*$
- Definir o factor de transformação  $\Gamma$
- Determinar a força  $F^*$  e deslocamento  $d^*$



$$\Gamma = \frac{\sum_i m_i \phi_i}{\sum_i m_i \phi_i^2} = \frac{m^*}{\sum_i m_i \phi_i^2}$$

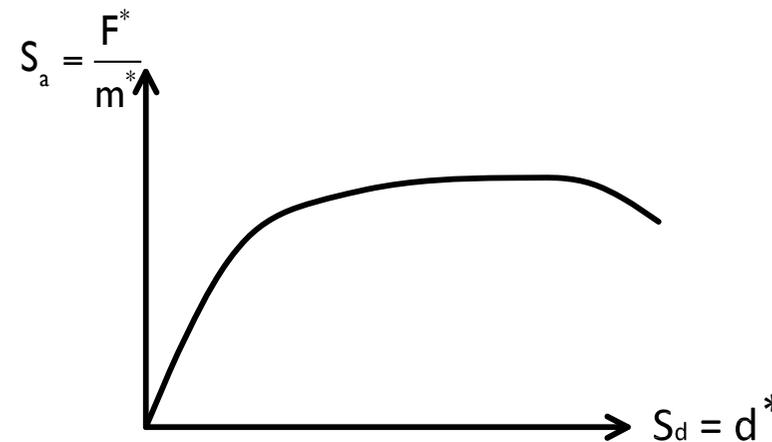
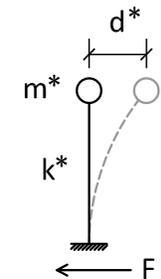
$$F^* = \frac{V}{\Gamma} \quad d^* = \frac{\Delta_{\text{topo}}}{\Gamma}$$

- **Descrição do método passo-a-passo:**

- Passo 4 – Sistema 1 GL equivalente

Conversão

- Determinar a força  $F^*$  e deslocamento  $d^*$
- Calcular o valor espectral da aceleração  $S_a$ - Curva capacidade resistente 1 GL





TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

- **Descrição do método passo-a-passo:**

- Passo 4 – Sistema 1 GL equivalente

Caracterização

- a. Definir uma relação bi-linear elasto-plástica equivalente
- b. Determinar a resistência equivalente  $F_y^* = m^* S_{ay}$  e o deslocamento de cedência do sistema idealizado  $d_y^* \rightarrow$  rigidez inicial  $K^*$

c. Calcular  $T^*$  
$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* d_y^*}{F_y^*}} = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{K^*}}$$



TÉCNICO  
LISBOA

- **Descrição do método passo-a-passo:**

- Passo 5 – Desempenho sísmico do sistema 1 GL equivalente

Definir o desempenho sísmico  $d_t^*$

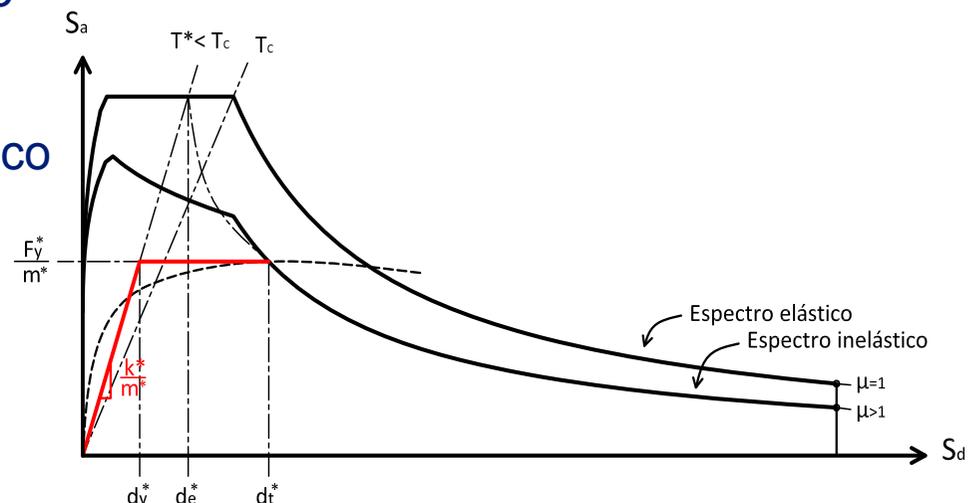
- Períodos baixos  $T^* < T_c$

- Comportamento elástico

$$d_t^* = d_e^*$$

- Comportamento inelástico

$$d_t^* = d_e^* \frac{\mu}{R_\mu} \geq d_e^*$$





TÉCNICO  
LISBOA

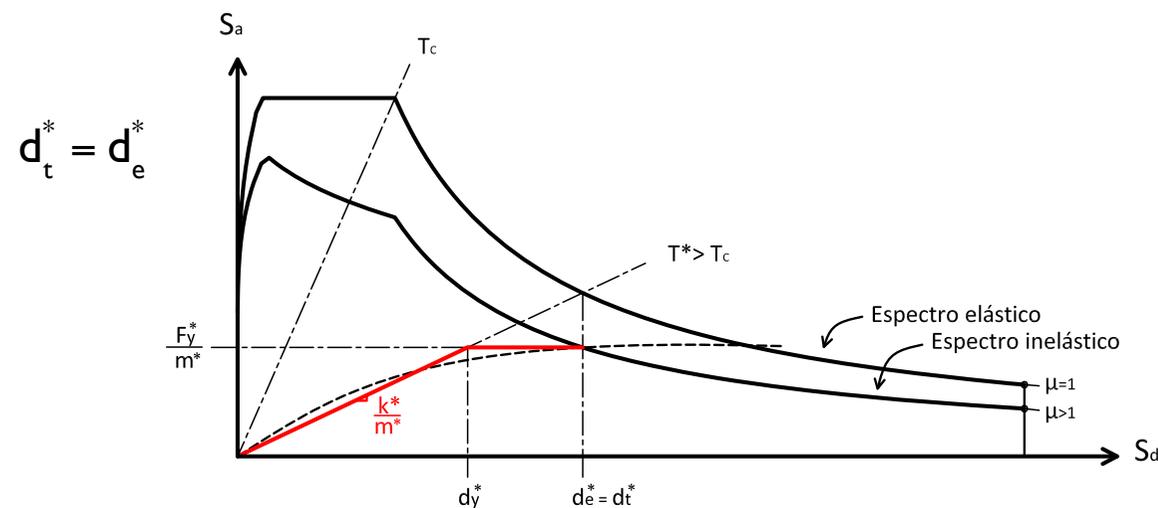
FUNDEC

- **Descrição do método passo-a-passo:**

- Passo 5 – Desempenho sísmico do sistema 1 GL equivalente

Definir o desempenho sísmico  $d_t^*$

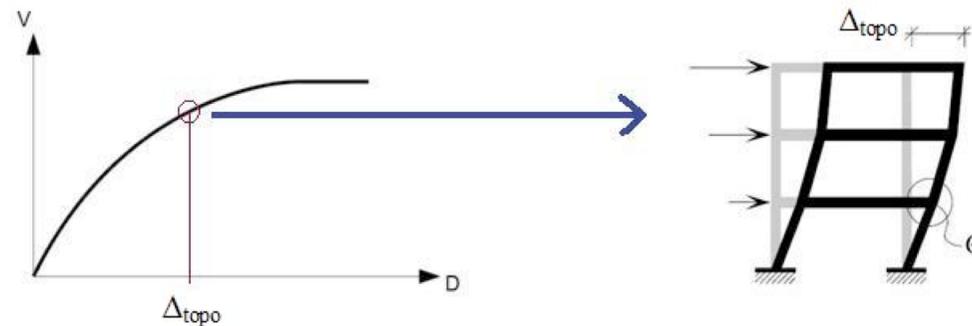
- Períodos médios e longos  $T^* > T_c$



- **Descrição do método passo-a-passo:**
  - Passo 6 – Desempenho sísmico da estrutura

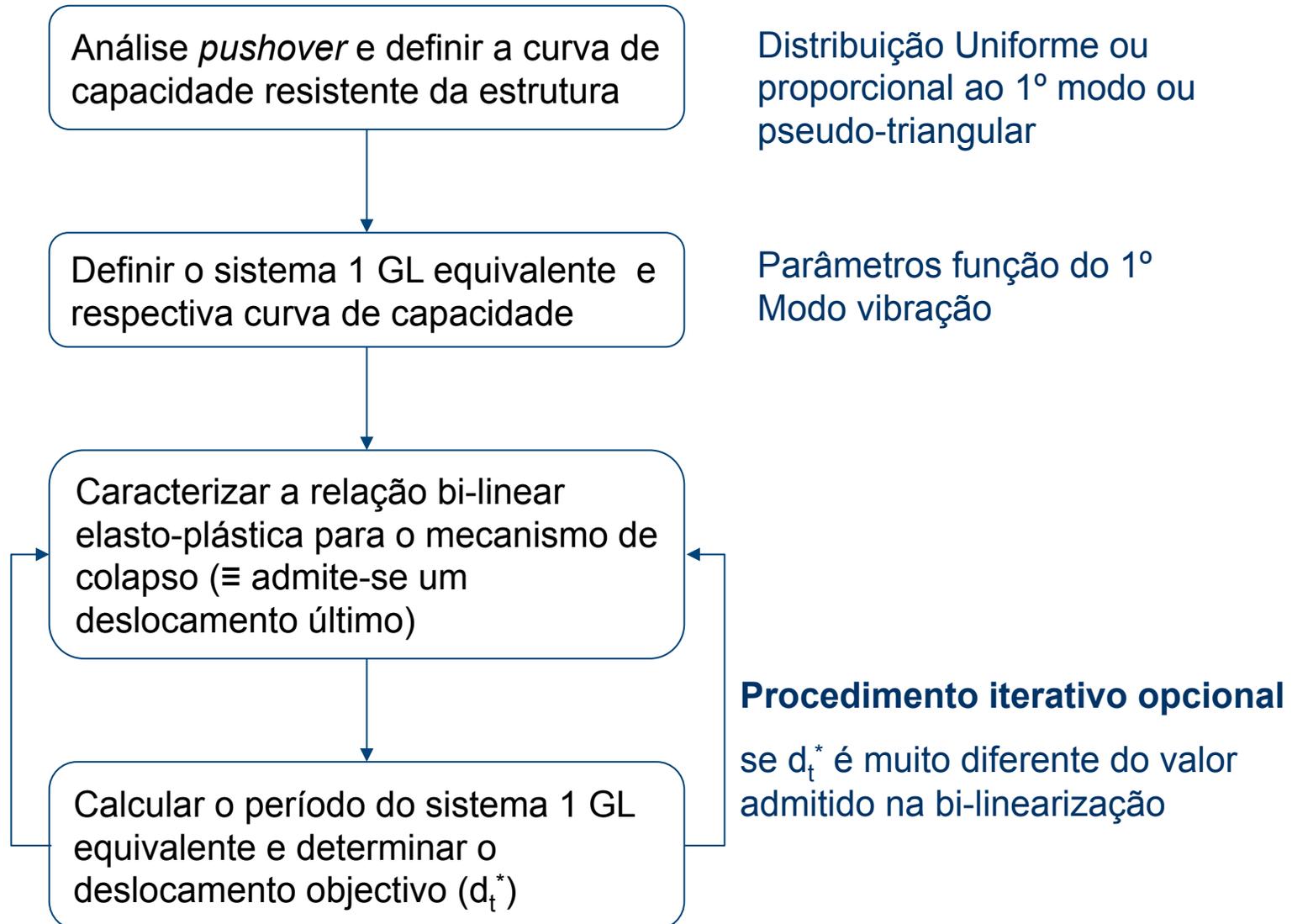
Deslocamento de topo

$$\Delta_{\text{topo}} = \Gamma d_t^*$$





## Método N2

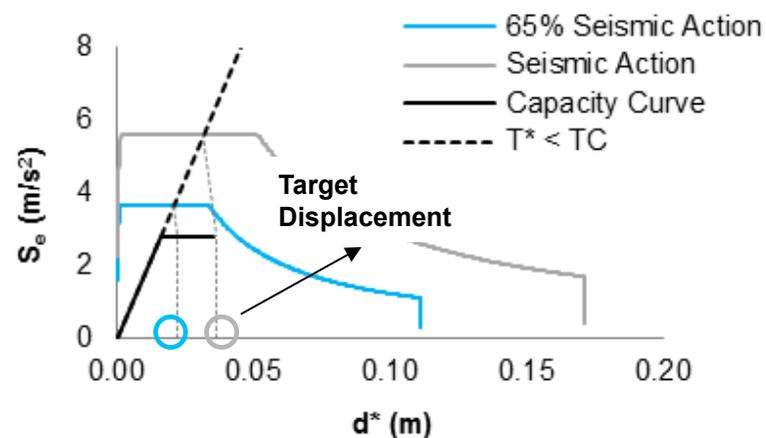
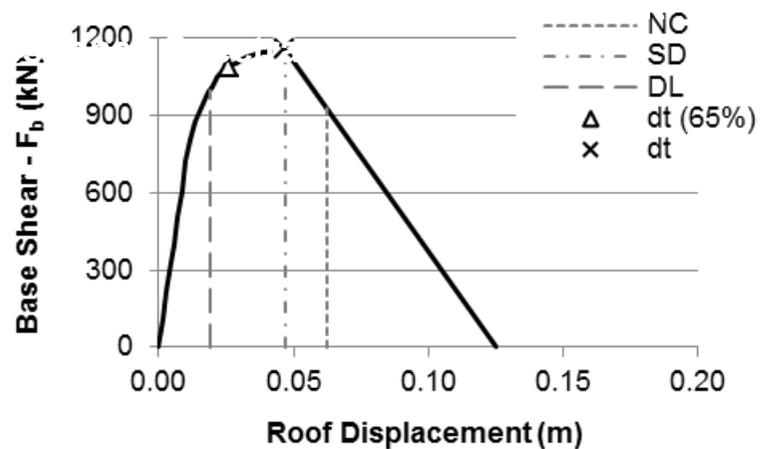
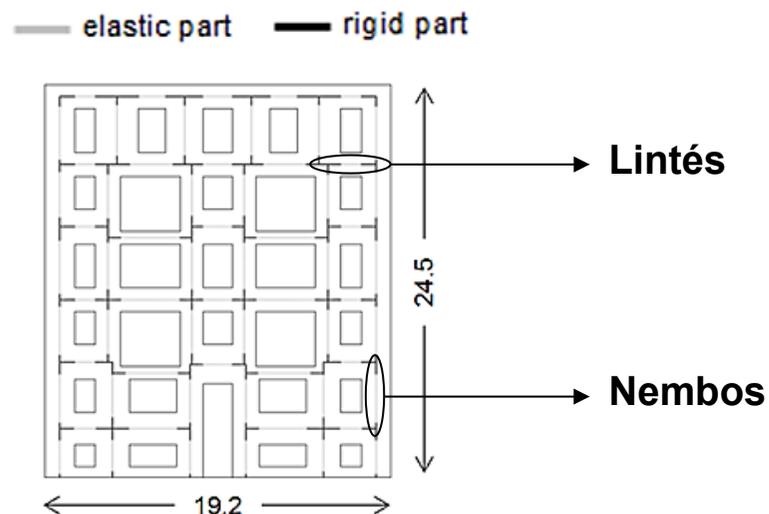
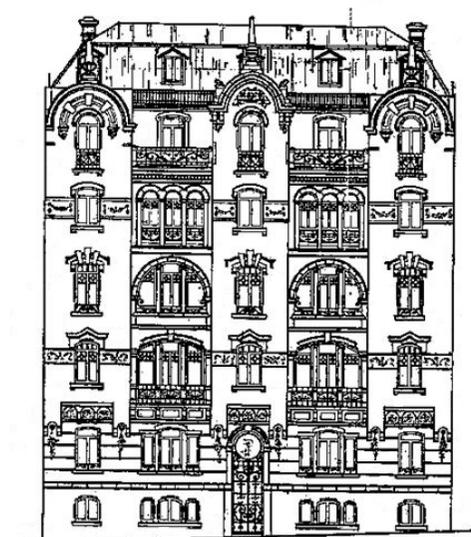




TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

## N2 - aplicação

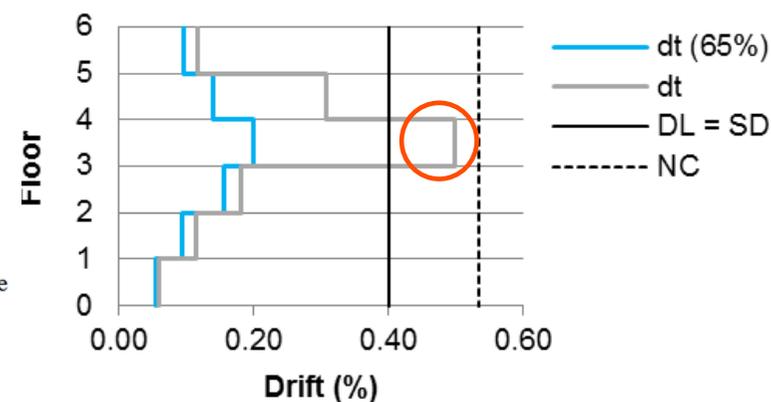
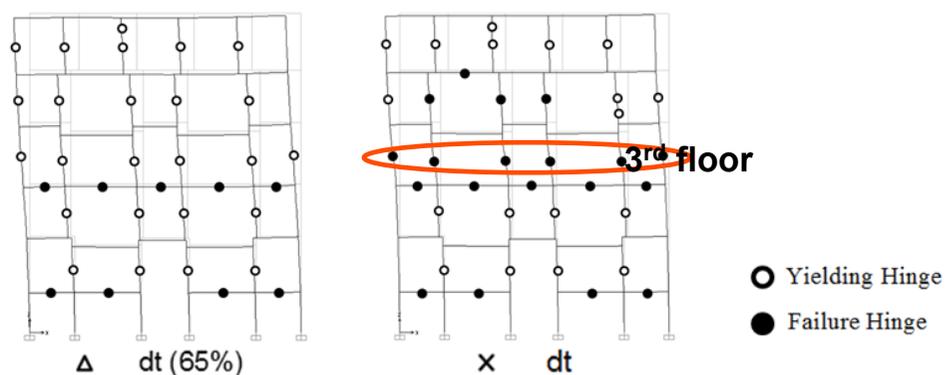
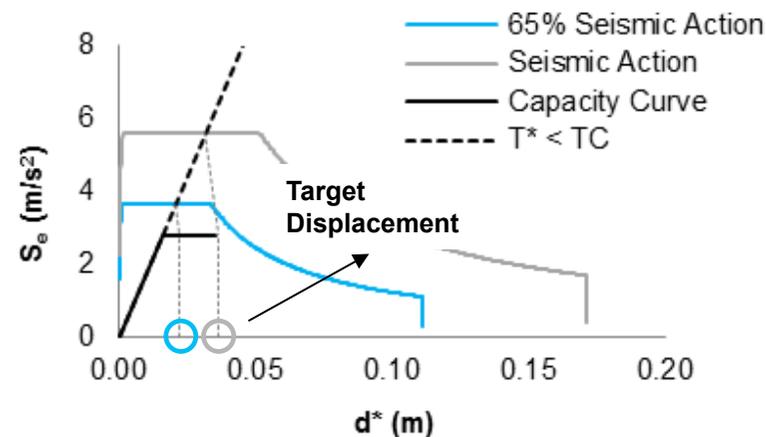
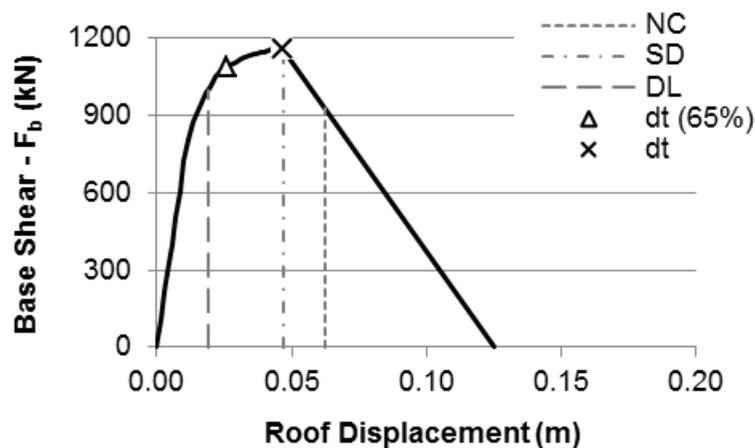




TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

## N2 - aplicação





TÉCNICO  
LISBOA

FUNDEC

## Referências

Pereira, D. (2009) *Estudo Sísmico de Edifícios Antigos. Reforço e análise não linear*. Dissertação Mestrado, IST, UTL, Lisboa.

Simões, A.; Bento, R.; Gago, A.; Lopes, M. (2012) *Seismic Vulnerability of old masonry 'Gaioleiro' Buildings in Lisbon*. 15º Conferência Mundial de Engenharia Sísmica (15WCEE), Lisboa.

Monteiro, M., Bento, R., (2013) *Seismic Characterization and Evaluation of an Old Masonry Building*, SE-50EEE, Skopia, Macedónia.

Simões, A.; Lopes, M., Bento, R.; Gago, A. (2012) *Characterization of Lisbon Old Buildings*, 15º Conferência Mundial de Engenharia Sísmica (15WCEE), Lisboa.